**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Centro de Energia Nuclear na Agricultura**

**Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de
serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios
*Piracicaba, Capivari e Jundiá***

Alba María Guadalupe Orellana Gonzalez

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2010**

Alba María Guadalupe Orellana Gonzalez
Licenciado en Economía

**Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços
ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios *Piracicaba, Capivari e
Jundiaí***

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Ecologia Aplicada

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Padovani, Carlos Roberto

Dinâmica espaço-temporal das inundações do Pantanal / Carlos Roberto Padovani. - -
Piracicaba, 2010.
174 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" . Centro de
Energia Nuclear na Agricultura, 2010.

1. Ecossistemas 2. Geoprocessamento 3. Hidrologia aplicada 4. Inundações - Pantanal
5. Modelos não lineares 6. Monitoramento ambiental I. Título

CDD 574.526
P124d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a
Rodrigo e Alejandro, meus maiores e
melhores motivadores e companheiros
nesta viagem maravilhosa que é a vida*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por todas as conquistas alcançadas e as bênçãos recebidas ao longo da minha vida.

A seguir gostaria de agradecer as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e me apoiaram durante todo este período.

A meu esposo Rodrigo e meu filho Alejandro, por seu apoio, paciência e amor.

Ao meu orientador, Prof. Marcos Vinicius Folegatti, um agradecimento muito especial. Meu maior respeito, carinho e admiração, pelo acadêmico e a pessoa que você é sempre empenhada em ajudar seus alunos, sempre oferecendo soluções práticas e conselhos sábios.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), pela oportunidade de ser parte de tão importante centro acadêmico e de pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro.

Aos professores do Programa em Ecologia Aplicada – Interunidades e do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP.

A todos os funcionários da Secretaria dos departamentos de Ecologia Aplicada – Interunidades e de Engenharia de Biosistemas: Mara, Bia, Sandra e Davilmar.

A todos aqueles com quem tive a oportunidade de conviver durante minha permanência no Departamento de Matemática Aplicada da Universidade de Valencia, Espanha. Aos professores desse departamento, nas pessoas do Prof. Rafael Plá e Ramón Caselles, muito obrigada pela recepção, respeito e apoio.

Expresso minha gratidão também a Paulo Henrique Pereira e Aurélio Padovanni, por atender prontamente as solicitações sobre dados e informações do projeto piloto de pagamentos por serviços ambientais “Conservador das Águas”.

Aos meus pais Oscar e Alba que mesmo no céu, continuam torcendo por mim como fizeram a vida toda.

A minha querida amiga Alma Leonard, por toda sua sabedoria e amor. Seus ensinamentos e carinho sempre me acompanham.

A minha querida irmã, Reyna, seu Marido Mario e meus sobrinhos Andrea, Mario e Rodrigo, pelo apoio e amor incondicional.

Aos amigos e amigas que conheci na ESALQ, Cesar e Liliosa, Pastora, e Freddy, Gracita e Freddy, Landy e Héctor, Cornélio e Janaina, Juan e Valeria muito obrigada pela ajuda, apoio, e momentos de descontração.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE QUADROS	21
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	23
1 INTRODUÇÃO	25
2 DESENVOLVIMENTO.....	33
2.1 Revisão bibliográfica	33
2.1.1 Desenvolvimento sustentável	33
2.1.2 Gestão dos recursos hídricos	37
2.1.2.1 Estudos sobre recursos hídricos	39
2.1.2.2 Situação da água doce no mundo	41
2.1.3 Capital natural, ecossistemas, serviços ecossistêmicos e valoração	43
2.1.3.1 Capital natural	43
2.1.3.2 Ecossistemas	45
2.1.3.3 Serviços ecossistêmicos – SE.....	48
2.1.3.4 Valoração do capital natural	52
2.1.3.5 Métodos de valoração de serviços ecossistêmicos	53
2.1.3.5.1 Considerações.....	53
2.1.3.5.2 Valoração dos bens e serviços ecossistêmicos.....	56
2.1.3.6 Valoração ecológica e modelos de simulação.....	66
2.1.3.7 Processos ecossistêmicos relacionados à prestação de serviços ecossistêmicos hídricos – SEH: O ciclo hidrológico	71
2.1.3.8 Ecossistemas florestais e serviços ecossistêmicos hídricos	82
2.1.3.9 Programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos – PSH	92
2.1.3.9.1 Experiências internacionais de programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos – PSH	94
2.1.3.9.2 Experiências de programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos – PSH no Brasil	102

2.1.3.9.2.1	O Programa “Produtor de Água” nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (BH-PCJ).....	104
2.1.3.9.2.2	O Projeto “Conservador das Águas” em Extrema, Minas Gerais.....	111
2.1.3.10	O pensamento sistêmico e a dinâmica de sistemas	115
2.1.3.10.1	O pensamento sistêmico – PS.....	116
2.1.3.10.2	O círculo de causalidade ou diagrama de influência para representar esquemas mentais	120
2.1.3.10.3	Modelo analítico	122
2.1.3.10.4	Princípios da dinâmica de sistemas	124
2.1.3.10.5	Etapas para a construção de um modelo de simulação dinâmica	127
2.1.3.10.6	O software STELLA e a modelagem e simulação dinâmica	128
2.1.3.10.7	Utilidade da dinâmica de sistemas.....	131
2.2	Material e métodos	134
2.2.1	Caracterização da área de estudo	134
2.2.1.1	Delimitação espacial	136
2.2.1.1.1	Sub-bacia das Posses	142
2.2.2	Fonte de dados	156
2.2.3	Desenvolvimento do MOVA	156
2.2.3.1	Etapas de conceitualização	157
2.2.3.1.1	Definição do modelo de retenção, filtragem e armazenamento de água	157
2.2.3.1.2	Diagrama de influência ou círculo de causalidade.....	159
2.2.3.2	Etapas de formalização	161
2.2.3.2.1	Diagrama de estoque e fluxo	162
2.2.3.2.2	Descrição matemática do modelo.....	166
2.2.3.2.3	Parâmetros do modelo.....	185
2.2.3.3	Validação do modelo matemático	194
2.3	Resultados e discussões	195
2.3.1	Etapas de simulação: aplicação do MOVA	196
2.3.2	Cenários avaliados na sub-bacia das Posses.....	200
2.3.2.1	Cenários considerando a altura de vegetação das áreas de nascente, de foz e mediana da sub-bacia das Posses.	200

2.3.3	Análise de sensibilidade	206
2.3.4	Exemplos de outras avaliações que podem ser realizadas com o MOVA	207
3	CONCLUSÕES	213
	REFERÊNCIAS.....	217
	ANEXOS	237

RESUMO

Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá

O objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver um modelo de simulação dinâmica para a valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos, baseado em princípios de “Dinâmica de Sistemas” com o auxílio do software STELLA. A hipótese básica adotada foi que: a valoração ecológica dos serviços ecossistêmicos deve contar com uma ferramenta integradora dos elementos envolvidos na modelagem ecológica como requisito básico para compreensão da dinâmica ecossistêmica que gera fluxos de serviços ecossistêmicos hídricos (SEH). Os SEH são os benefícios gerados a partir das complexas interações, entre os componentes do ciclo hidrológico e que tem a ver com a preservação tanto em quantidade como em qualidade da oferta de água. O modelo foi desenvolvido, através de uma análise sistêmica dos processos ecossistêmicos compreendidos dentro do ciclo hidrológico, foram determinadas as principais variáveis e suas respectivas inter-relações, de acordo com a estrutura desse ciclo. Essa estrutura foi representada no diagrama causal, que serviu de base à elaboração do diagrama de estoque e fluxo, por meio do qual se estabeleceu o modelo matemático que permitiu efetuar a simulação numérica. A escala temporal de aplicação do modelo é diária e foram efetuadas 365 simulações, o que permitiu estimar fluxos anuais de SEH. O modelo foi parametrizado na sub-bacia das Posses, Município de Extrema, Minas Gerais; aqui esta sendo implementado o primeiro projeto piloto, baseado na relação floresta-água, de pagamentos por SEH do Brasil. Foram examinados 36 cenários, com o objetivo de avaliar o impacto que têm variáveis como: textura de solo, altura da vegetação, índice de área foliar e profundidade do lençol freático na geração dos fluxos de SEH em água na superfície, infiltrada e armazenada; porém foi avaliado como estes incidem de forma quantitativa na manutenção da oferta de água disponível. O modelo desenvolvido permitiu aumentar a compreensão dos fluxos de SEH, o que representa uma ferramenta de elevado potencial de aplicação nas fases de definição de âmbito, de avaliação de alternativas e monitoramento de esquemas de pagamentos por SEH no Brasil.

Palavras-chave: Ciclo hidrológico; Balanço hídrico; Modelagem ecológica; Dinâmica de sistemas

ABSTRACT

Dynamic simulation model to valuate ecological hydrological services at Piracicaba, Capivari e Jundiá rivers basin

The main objective of this research was to develop a dynamic simulation model to valuate ecological hydrological ecosystem services. The principles of "System Dynamics" were applied using the software STELLA. A basic hypothesis was adopted: ecological valuation of ecosystem services must use a tool to integrate all the elements involved in ecological modeling, as a basic requirement to understand the ecosystem dynamic that generates water fluxes as hydrological ecosystem services (HES). HES are the benefits generated from complex interactions that occur within the hydrologic cycle; those interactions deal with the preservation of available water, in quantity and quality. The model was developed after a systemic analysis of the ecosystem processes involved in the hydrologic cycle; pointing out the main variables and the inter-relations that constitute it. Then, the structure of those relations was represented in a causal diagram; becoming the base to build up the stocks and flows diagram. This later diagram established the mathematical model that allowed the numerical simulation. The time step of the model is one day during 365 days, estimating annual water HES. The model was parameterized at Poses sub-watershed, Extrema County, Minas Gerais. In Extrema was established the first payment for HES project in Brazil, based on the relationship between forest land and water availability. Thirty six scenarios were studied considering surface, infiltrated and stored water services fluxes; affecting the availability of water. The objective of those scenarios was to evaluate the impact that variables such as: soil texture, vegetation height, leaf area index and groundwater depth have on water flux generation. The model developed enables to increase the understanding of HES fluxes, becoming a tool with a broad spectrum of applications during the stages of assessing and scoping alternatives for payment of environmental services and to monitor HES programs in Brazil.

Keywords: Hydrologic cycle; Water balance; Ecological modeling; Dynamic systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de um ecossistema.....	45
Figura 2 – Perfil de um ecossistema formado pela mata ciliar e um riacho	46
Figura 3 – Componentes, funções e métodos de manejo da biodiversidade em agroecossistemas	47
Figura 4 – Serviços ecossistêmicos por categoria	50
Figura 5 – Marco conceitual sobre bens e serviços ecossistêmicos	55
Figura 6 – Valor econômico total e métodos de valoração propostos pela economia ambiental.....	57
Figura 7 – Diagrama de fluxo circular entre agentes econômicos	61
Figura 8 – Esquema para avaliar serviços ecossistêmicos	66
Figura 9 – Esquema do ciclo hidrológico.....	72
Figura 10 – Esquema de uma bacia hidrográfica.....	76
Figura 11 – Representação esquemática dos processos hidrológicos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica	77
Figura 12 – Secção transversal de uma bacia hidrográfica com as variáveis hidrológicas envolvidas no seu balanço hídrico	78
Figura 13 – Mapa de uso do solo Sistema Cantareira	106
Figura 14 – Microbacias prioritárias para a “produção de água” nas bacias hidrográficas dos Rios PCJ.....	110
Figura 15 – Município de Extrema, MG	112
Figura 16 – Essência, princípios e práticas do pensamento sistêmico.....	118
Figura 17 – Diagrama de influencia do sistema de recursos hídricos nas BH-PCJ	121
Figura 18 – Laço de retroalimentação: (a) positiva e (b) negativa	126
Figura 19 – Símbolos utilizados pelo software STELLA na representação de um estoque; fluxos com taxa de entrada e de saída; conector de informação inicial; conector; conversor ou variável auxiliar; variável gráfica e variável fantasma	129
Figura 20 – Tela de construção de modelos no ambiente computacional STELLA	131

Figura 21 – Classes de modelos possíveis de serem estudados com Dinâmica de Sistemas	133
Figura 22 – Municípios que integram as BH-PCJ	135
Figura 23 – Localização da área de estudo	137
Figura 24 – Sub-bacias do município de Extrema	138
Figura 25 – Evolução do uso da terra município de Extrema, MG de 1955 a 2006 (em % de área total do município).....	139
Figura 26 – Mapa Climático de Brasil	140
Figura 27 – Configuração da paisagem, Extrema, MG.....	142
Figura 28 – Sub-bacia das Posses, Extrema, MG, contendo sua rede de drenagem.....	143
Figura 29 – Mapa de declividade da sub-bacia das Posses, Extrema, MG	145
Figura 30 – Mapa de solos presentes na sub-bacia das Posses, Extrema, MG.....	146
Figura 31 – Mapa de uso atual do solo na sub-bacia das Posses, Extrema, MG...	148
Figura 32 – Mapa das classes de capacidade de uso do solo presentes na sub-bacia das Posses, Extrema, MG	150
Figura 33 – Mapa das áreas de preservação permanente instauradas na sub-bacia das Posses, Extrema, MG	151
Figura 34 – Mapa de aptidão agrícola das terras da sub-bacia das Posses, Extrema, MG	153
Figura 35 – Diagrama Conceitual dos Processos Hidrológicos.....	158
Figura 36 – Percurso da água num território.....	159
Figura 37 – Diagrama de Influencia do MOVA	160
Figura 38 – Diagrama de estoque e fluxos	162
Figura 39 – Modelo de simulação construído no Software STELLA	165
Figura 40 – Modelo conceitual do setor hidrológico.....	166
Figura 41 – Relação entre o coeficiente de rugosidade de Manning, profundidade da água e altura da vegetação.	171
Figura 42 – Fluxos de água superficial	171

Figura 43 – Água na zona não saturada	173
Figura 44 – Água na zona saturada.	175
Figura 45 – Principais fatores que afetam a evaporação.....	179
Figura 46 – Principais fatores que afetam a infiltração	183
Figura 47 – Percolação.....	184
Figura 48 – Interface do MOVA.....	198
Figura 49 – Estoques de água superficial, zona saturada e zona não saturada.....	208
Figura 50 – Variáveis relacionadas ao processo de evapotranspiração	209
Figura 51 – Valores diários de evaporação, precipitação e transpiração (m).....	210
Figura 52 – Valores diários de interceptação e precipitação (m).....	210
Figura 53 – Comportamento anual da precipitação, infiltração e fluxo superficial/escoamento superficial (m d^{-1})	212

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Enfoques da economia ambiental e da economia ecológica comparativamente.....	64
Tabela 2 – Serviços ecossistêmicos fornecidos por bacias hidrográficas	81
Tabela 3 – Função das instituições parceiras no projeto “Conservador das Águas”	113
Tabela 4 – Distribuição do relevo da sub-bacia das Posses	144
Tabela 5 – Distribuição dos solos na sub-bacia das Posses em hectares e % de área ocupada por classe.....	147
Tabela 6 – Distribuição das áreas de capacidade de uso do solo na sub-bacia das Posses, Extrema, MG, ocupada por classe.....	149
Tabela 7 – Distribuição por categorias de aptidão agrícola na sub-bacia das Posses, Extrema, MG	152
Tabela 8 – Características geográficas e topográficas	186
Tabela 9 – Intervalos de inclinação	187
Tabela 10 – Variáveis do fator vegetação	187
Tabela 11 – Profundidade das raízes segundo o grupo funcional de crescimento	189
Tabela 12 – Parâmetros de Green-Ampt para várias texturas de solo.....	190
Tabela 13 – Descrição dos grupos de solos com base nas suas características hidrológicas	191
Tabela 14 – Taxas de infiltração usadas no MOVA segundo a textura do solo ..	192
Tabela 15 – Variáveis do fator hidrológico	192
Tabela 16 – Variáveis do fator clima	193

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Áreas das sub-bacias do Rio Piracicaba (SP e MG)	136
Quadro 2 – Áreas totais das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí	136
Quadro 3 – Espécies amostradas nos fragmentos da sub-bacia do Ribeirão das Posses.....	155
Quadro 4 – Quantidades de água superficial, infiltrada e armazenada obtida em cada cenário estudado ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).....	202
Quadro 5 – Classes de solos, tipos de horizonte A, fases de relevo e potencial de recarga da sub-bacia das Posses em Extrema, MG	204
Quadro 6 – Quantidades totais de SEH obtidos em cada cenário estudado na análise de sensibilidade ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).....	206

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APP's	Áreas de Preservação Permanente
BH-PCJ	Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
CATI	Coordenadoria de Assistência Técnica Integral
CBH-PCJ	Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
CT-Rural	Câmara Técnica de Uso e Conservação da Água no Meio Rural
DS	Dinâmica de Sistemas
DNM	Departamento Nacional de Meteorologia
EEQ	Companhia e Empresa Elétrica de Quito
EMAAP-Q	Companhia Municipal de Água de Quito
EPA	Agência para a Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FONAFIFO	Fundo Nacional de Financiamento Florestal
FONAG	Fundo para Conservação de Água
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEF	The Global Environment Facility
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MOVA	Modelo de Valoração Ecológica de Serviços Ecossistêmicos Hídricos
ONG	Organismo Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
PS	Pensamento Sistêmico
PSE	Programas de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos
PSH	Programas de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos Hídricos
RL	Reserva Legal
SABESP	Companhia de Abastecimento de Água e Saneamento do Estado de São Paulo
SE	Serviços Ecossistêmicos

SEH	Serviços Ecossistêmicos Hídricos
SIGAM	Sistema Integrado de Gestão Ambiental
SIGRH	Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo
SMA	Secretaria do Meio ambiente
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
STELLA	Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation
TNC	The Nature Conservancy
UNCED	Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

1 INTRODUÇÃO

Os serviços ecossistêmicos (SE) são definidos como aqueles benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas. De acordo com DE GROOT et al. (2002), as primeiras referências ao conceito de funções dos ecossistemas, serviços e valor econômico destes, datam da década de 60 e princípios dos anos 70. Esses benefícios podem agrupar-se em quatro grandes categorias, de acordo com o Programa Ecosystem Millenium Assessment (ECOSYSTEM MILLENIUM ASSESSMENT - MA, 2005):

- i) Provedoras (ex. alimentos, água, fibras),
- ii) Reguladoras (ex. regulação do clima, purificação da água),
- iii) Culturais (ex. valores espirituais, paisagem, usos recreativos), e
- iv) Suporte (ex. formação do solo, ciclo de nutrientes).

Devido à constante e sistemática degradação antrópica que sofrem os ecossistemas é que têm sido iniciados vários programas de *pagamentos* por serviços ecossistêmicos (PSE), em distintas partes do mundo (FAO, 2004; PAGIOLA et al., 2003). Esses programas têm como objetivo promover o manejo sustentável dos ecossistemas através de incentivos econômicos.

O Brasil vem estudando estratégias para conservar e recuperar ecossistemas, focadas nos serviços ecossistêmicos hídricos – SEH e na compensação financeira aos produtores rurais pela adoção e/ou fortalecimento de ações protetoras do meio ambiente.

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho está focada na modelagem e simulação dos processos ecológicos que geram SEH, que podem ser definidos como aqueles benefícios resultantes do ciclo hidrológico e que estão relacionados à manutenção da oferta de água disponível tanto em quantidade como em qualidade. No caso particular deste trabalho a atenção principal foca-se nos serviços vinculados à quantidade de água superficial, infiltrada e armazenada nos locais onde estão sendo implementados Programas de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos Hídricos (PSH) no Brasil.

Historicamente, a gestão da água no Brasil, a partir de uma perspectiva jurídica, tem como ponto de partida a edição do Código das Águas em 1934. Esse texto

constitui o principal instrumento jurídico federal de regulamentação até 1997, com a edição da Lei Federal nº 9.433, considerada o pilar central da gestão de águas no País (BRASIL, 1997). Esta Lei nasce como produto dos acordos resultantes da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio-92, e é a partir daí que o Brasil vem implementando mecanismos inovadores para o uso e gestão dos recursos hídricos.

Em 1997, o Congresso Brasileiro normatizou o consumo e a conservação de recursos hídricos mediante o Código das Águas, Lei no. 9.433, que considera o recurso hídrico um item “vulnerável, finito, escasso em quantidade qualidade” e, devido à sua escassez, transforma-se, de acordo com a lei, em um bem econômico que deve ser pago (FREIRE, 2001; PETRELLA, 2001; GESUALDI, 2001). No ano de 2000, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), com o objetivo de implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos. Sob a mesma perspectiva, vem-se implementando os Comitês e os Planos Diretores de Bacias Hidrográficas.

A gestão das águas, vista a partir de uma perspectiva social, têm, na década de 60 do século passado, seu início. Foi quando foram realizados os primeiros estudos de planejamento de recursos hídricos tendo a bacia hidrográfica como unidade territorial de gestão. Na década de 80, apareceram às primeiras iniciativas de organização das sociedades locais, a constituição de consórcios intermunicipais para a gestão de bacias hidrográficas. Nos anos 90, a gestão social da água teve seu início propriamente dito, materializado em leis estaduais de recursos hídricos, criação de conselhos estaduais e a formação dos primeiros Comitês de Bacias. Hoje o Brasil possui em torno de 150 Comitês de bacias hidrográficas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2010; SILVA, 2002).

No que diz respeito aos SE, a Lei 9.985/2000 (BRASIL, 2000), que regulamenta o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), define os instrumentos de PSE. Reconhecendo assim, que tais unidades proporcionam SE de distintas naturezas.

Essa Lei estabelece alguns instrumentos que visam o fortalecimento da gestão das unidades de conservação numa tentativa de reverter o quadro de precariedade da

maioria das áreas protegidas. Dentre esses instrumentos, existem aqueles que podem ser enquadrados como PSE.

Dentro do SNUC, os artigos 47 e 48 envolvem os serviços de proteção dos recursos hídricos fornecidos pelas áreas protegidas. Estes artigos trazem de forma evidente a teoria dos PSE em seu conteúdo. Obrigando aqueles que se beneficiam de um serviço específico (a proteção hídrica) a pagar para aqueles que oferecem tal serviço (as unidades de conservação). Empresas de abastecimento e de geração de energia possuem demandas específicas por serviços florestais que conservem o fluxo e a qualidade da água.

A compensação ambiental possui grande potencial de gerar recursos financeiros, podendo atuar de forma significativa para a manutenção e criação de unidades de conservação.

Experiências de PSE em outros países mostram que, o projeto dos programas de PSE, representam relevante papel para o sucesso de conservação de recursos naturais e recursos hídricos. Num estudo efetuado para a Comissão de Cooperação Ambiental Americana, Mayran e Paquin (2004) avaliaram 25 esquemas de PSE e encontraram que esses tendem a operar melhor quando:

- i) Embasam-se em evidência científica clara e de consenso, as quais relacionam os usos do solo e a provisão de serviços;
- ii) Definem de forma clara, os serviços a serem fornecidos;
- iii) Os contratos e os pagamentos são modificáveis, contínuos e sem restrições;
- iv) Os custos de transação não excedem aos benefícios potenciais;
- v) Apóiam-se em fontes de verbas múltiplos que abarcam fluxo de recurso financeiro suficientes e sustentável ao longo do tempo;
- vi) Os compromissos, as mudanças nos usos do solo e a provisão dos serviços são cuidadosamente monitoradas; e
- vii) São o suficientemente modificáveis para permitir ajustes que melhorem sua eficiência e eficácia , assim como, sua adaptação a condições mutantes.

Segundo Tognetti et al. (2003) no caso particular das bacias hidrográficas, o Banco Mundial planeja criar um manual de opções de manejo. Este manual

estabeleceria como prioritária a medição dos serviços na bacia hidrográfica e a identificação de convênios institucionais efetivos. No que diz respeito à medição dos serviços deve-se esclarecer que os processos dos ecossistemas só podem considerar-se como serviços ecossistêmicos se tiverem algum significado econômico para a parte interessada.

Por outro lado, além de estimar o balanço de água é preciso contabilizar as necessidades e os usos da mesma. Tendo essas informações integradas é possível gerar um Índice de Manejo do Recurso e revelar o grau segundo o qual a água é um fator escasso durante os períodos secos. Dessa forma, é possível estimar a demanda e calcular a disposição a pagar dos usuários, por serviços específicos associados a sua provisão, assim como identificar as áreas prioritárias para a implementação de práticas de conservação.

Em conclusões publicadas, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (2004) mostra que em alguns casos, o PSE não é o método mais rentável para alcançar os objetivos planejados, podendo inclusive gerar incentivos não previstos ou criar problemas ambientais em outros locais. Isso pode acontecer quando, por exemplo, não se estabelece qual será o SE a ser fornecido e quando não se determinam quais são os locais onde esse serviço pode ser produzido de forma mais eficiente.

Nesse particular, Senge e Sterman (1994) afirmam que em muitas ocasiões os resultados que vão contra a intuição, resultam das limitações de nossos modelos mentais ao enfrentarmos a sistemas complexos, devido aos processos de realimentação entre variáveis. As relações não lineares e os atrasos nos tempos de resposta podem superar a capacidade de entendimento. De acordo com Van Den Belt (2004), é preciso utilizar ferramentas que permitam analisar as conseqüências das políticas de gestão. Uma dessas é a construção explícita de modelos de simulação (SENGE; STERMAN, 1994).

Por outro lado, a simulação é uma forma de testar e refinar os resultados dessas abstrações e, portanto, também podem modificar os modelos mentais (EQUIHUA; PÉREZ-MARQUEO, 2007). Entre outras coisas, o enfoque baseado na construção de modelos é útil para planejar, organizar e modificar Programas de PSE de forma

sistêmica; além do que permite detectar vácuos de informação, facilita a comunicação interdisciplinar e favorece a formulação de novas perguntas sobre o tema (VAN DEN BELT, 2004; DALE, 2003; PÉREZ-MAQUEO et al., 2001; HAEFNER, 1996).

Nesse contexto, o presente trabalho consistiu-se na formulação e aplicação de um modelo de simulação dinâmica para a valoração ecológica de SE hídricos, nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (BH-PCJ). O estudo está fundamentado no enfoque sistêmico, o qual permitiu a formulação explícita de um modelo teórico dos processos subjacentes à prestação de SE hídricos, que compreendem dois sistemas complexos: o biológico e o físico que geram a oferta de serviços.

Atualmente, alguns trabalhos dentro do contexto de PSE começam a desenvolver-se, sob essa perspectiva, a fim de lidar com problemas tão diversos quanto: o entendimento dos processos funcionais dos ecossistemas, a avaliação de métodos de valoração, e a análise integral destes aspectos em distintas escalas temporais e espaciais (VAN DEN BELT, 2004; PORTELA; RADEMARCHER, 2001; REYES et al., 1996; FITZ et al., 1996).

Atualmente, o tema da valoração integral dos SE é de grande interesse no Brasil e no mundo. A preocupação sobre como internalizar o capital natural que condiciona as atividades produtivas e o bem-estar da sociedade é tema central na procura do desenvolvimento social, econômico e ambiental. No Brasil, o caminho que está se definindo, nesse sentido, é a valoração dos serviços ecológicos e a geração de políticas públicas condizentes com preservação e recuperação de recursos naturais.

Nesse contexto, torna-se importante a formulação explícita de um modelo baseado no enfoque sistêmico dos processos envolvidos na geração de SEH que poderia ser empregado na elaboração, implementação e avaliação de PSH no Brasil. Esses processos são os que acontecem dentro das matas e florestas e que repercutem diretamente: i) na manutenção da capacidade de recarga dos mantos aquíferos; ii) na manutenção da qualidade da água; iii) na diminuição da carga de sedimentos à jusante; iv) na redução das correntezas durante eventos de precipitação; v) na conservação de mananciais; vi) no maior volume de água superficial disponível na época seca; e vii) na

redução do risco de enchentes. Aspectos estes, que dependem da dinâmica ecossistêmica no marco do desenvolvimento do ciclo hidrológico.

A área escolhida para o estudo são as BH-PCJ. Bacias que fazem parte da atual Política de Recursos Hídricos que, no Brasil, instituiu a Agência Nacional das Águas com a competência para implementar, em articulação com os Comitês de Bacia Hidrográfica, os instrumentos de gestão para o uso, manejo e conservação dos recursos hídricos de domínio da União.

As BH-PCJ contam com uma serie de iniciativas para a gestão dos recursos hídricos que estão sendo desenvolvidos pelo Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (CBH-PCJ), que por sua vez está estruturado em Câmaras Técnicas e Grupos Técnicos de Trabalho. Como parte integrante do CBH-PCJ, encontra-se a Câmara Técnica de Uso e Conservação da Água no Meio Rural (CT-Rural), criada pela Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ 022/05 de 31/03/05. A CT-Rural possui dentre suas atribuições, i) propor diretrizes e ações conjuntas e ii) promover a integração e a otimização de procedimentos entre as instituições que atuam no meio rural visando à preservação, conservação e uso sustentável dos recursos hídricos.

A relevância deste projeto de pesquisa se traduz com relação ao estágio em que se encontra o CBH-PCJ com respeito ao processo de cobrança e a compensação de serviços ecossistêmicos hídricos, que pode ser entendido com histórico do conquistado ate aqui:

i) Foi publicada no Diário Oficial do Estado em 25/10/2005 a aprovação da Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ nº 025/05, ocorrida em 21/10/2005. Tal Deliberação estabelece mecanismos e sugere valores para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e dá outras providências.

ii) Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ nº 025/05 foi enviada ao Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH) que, em 28/11/2005, aprovou em Brasília a implantação da cobrança pelo uso das águas dos rios federais da Bacia do Rio Piracicaba.

iii) Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ nº 028/05 aprova em 21/12/2005 o “Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2004/2207”.

iv) Mediante proposta elaborada e deliberada pela CT-Rural, em referência aos PSE no campo de ação dos Comitês PCJ, se incluiu o item 4.03 no quadro da página 463 do “Plano das BH-PCJ 2004/2207”. Encontra-se a nova Ação Específica de Curto Prazo com a seguinte redação: “Implantar Projetos Piloto do Programa Produtor de Água proposto pela Agência Nacional de Águas, ou similar, contemplando parcerias e as recomendações previstas no princípio provedor-recebedor: pagamento por serviços ecossistêmicos relacionados com a água” (CBH-PCJ, 2007). Essa Ação Específica de Curto Prazo não existia e foi incluída recentemente, permitindo, de forma pioneira no país, a inscrição de empreendimentos (para a captação de recursos da cobrança pelo uso da água) envolvendo PSE. Com isto será possível a implementação do modelo conservacionista (projeto-piloto) no Plano das bacias hidrográficas (SANTOS, 2007). O objetivo maior do projeto é a experimentação de PSH numa região prioritária das BH-PCJ a montante das Barragens do “Sistema Cantareira” de forma que, se os resultados forem positivos, a aplicação dos PSH poderá ter uma maior abrangência nas Bacias PCJ, bem como servir de exemplo para a gestão de recursos hídricos no âmbito de outros Comitês do país.

Em debates ocorridos nos Encontros Nacionais de Comitês de Bacias atestam que os trabalhos desenvolvidos pelo CBH-PCJ têm servido de modelo para outros Comitês distribuídos no país e, provavelmente, estarão contribuindo para um futuro detalhamento da Política Nacional de Recursos Hídricos com a inserção de leis específicas sobre o reuso da água, atividades agrícolas, conservação dos solos, pagamentos por serviços ambientais, dentre outros aspectos.

Portanto, essa pesquisa visa ser uma ferramenta na formulação de políticas e projetos que busquem promover o desenvolvimento tanto econômico quanto social e ambiental, particularmente no referente ao monitoramento e avaliação, sob perspectiva ecossistêmica, de projetos de PSH.

A hipótese básica adotada foi que, a valoração ecológica dos serviços ecossistêmicos, deve contar com uma ferramenta integradora dos elementos envolvidos

na modelagem ecológica como requisito básico para compreensão da dinâmica ecossistêmica que gera fluxos de SEH.

O objetivo principal da pesquisa consistiu-se na formulação de um modelo de simulação para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas BH-PCJ, utilizando a metodologia da dinâmica de sistemas – DS.

Os objetivos específicos foram: i) desenvolvimento de um processo de modelagem de sistemas dinâmicos para simular as funções do ecossistema que geram SEH, mediante a obtenção de modelos mentais de especialistas e a construção de diagramas de influência, de estoque e de fluxos; ii) elaboração e validação do modelo matemático que representa os processos de infiltração, retenção e armazenagem de água na área de estudo, e identificação das variáveis biofísicas que tem maior efeito nestes processos; iii) simulação do comportamento do modelo sob diferentes cenários, tais como: diferentes alturas de vegetação; diferentes texturas do solo e diferente profundidade do lençol freático.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Desenvolvimento sustentável

Em 1987 a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas (UNCED) emitiu o documento “Nosso Futuro Comum”, também conhecido como Relatório Brundtland (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT - WCED, 1987) surgindo assim o conceito de desenvolvimento sustentável. Tal conceito coloca na agenda global a necessidade de visar um novo modelo econômico e uma nova relação do homem com o planeta. De acordo com o Relatório “*o desenvolvimento sustentável consiste num conjunto de ações geradoras de processos inovadores para o uso dos recursos naturais, para o direcionamento dos investimentos, e para a orientação do desenvolvimento tecnológico, com o propósito de garantir a expectativa e o potencial de vida tanto das presentes como das futuras gerações*” (WCED, 1987). Desde então o conceito de “Desenvolvimento Sustentável” começa a se firmar, na agenda de vários países da terra, quando Gro Harlem Brundtland, a presidente da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, explica à Assembléia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) que se tratava de um “conceito político” (SOUZA, 2008).

Este posicionamento, marco na evolução da discussão ambiental mundial, defende que o desenvolvimento e a proteção ambiental não podem ser dissociados. Pelo contrário, são partes do mesmo processo e nenhum processo de desenvolvimento pode ser sustentável se a base de recursos se deteriora ao longo do tempo. O relatório afirma, porém, que o cuidado com o meio ambiente não é um objetivo por si próprio, mas na verdade um meio para assegurar e tornar possível o desenvolvimento de longo prazo, de forma tal que a qualidade de vida das sociedades humanas possa ser continuamente melhorada (WCED, 1987). Pela primeira vez na história, o conceito de desenvolvimento incorporou a questão ambiental como central. O conceito de desenvolvimento sustentável foi enquadrado na forma hoje clássica, como sendo o desenvolvimento realizado com equidade social, com progresso econômico e com proteção ambiental. Os três pilares do conceito devem ser interligados, e

necessariamente estar presentes, sem que nenhuma dimensão domine sobre as outras, sob pena de falha da sustentabilidade no longo prazo.

Segundo Souza (2008) necessariamente, o conceito de desenvolvimento sustentável também leva em consideração as noções de tempo e de espaço: i) em relação ao tempo, quando se considera desenvolvimento sustentável aquele que atende as necessidades das gerações presentes sem comprometer a habilidade das futuras gerações para atender às suas respectivas necessidades, e ii) Em relação ao espaço a análise realizada para avaliar impactos ao desenvolvimento sustentável sempre leva em consideração os diversos níveis espaciais, o global, o nacional, o regional e o local.

Tomando como base a definição do relatório Brundtland, diversos autores têm elaborado e discutido diversos conceitos a respeito do desenvolvimento sustentável.

Para Ehlers (1999), o desenvolvimento sustentável deve conciliar no longo prazo o crescimento econômico e a conservação dos recursos naturais. Segundo Moreira (1999) esse desenvolvimento deve estar vinculado ao uso, equilíbrio e à dinâmica dos recursos da biosfera, tanto no presente como no futuro. Romeiro (1998) agrega que o desenvolvimento sustentável deve ser economicamente eficiente, ecologicamente prudente e socialmente desejável.

Para Denardi et al. (2008), o conceito de desenvolvimento sustentável é um conceito ainda em construção, sendo muito debatido e polêmico. Segundo o autor o conceito tem sofrido mudanças ao longo do tempo. No início existia uma natural confusão entre desenvolvimento e crescimento econômico, esse último medido através de variáveis quantitativas representativas do crescimento da economia em função da produção e de aumentos na produtividade. Esse conceito refletia o pensamento econômico da Escola Austríaca. Dita escola entendia também, que a intervenção do Estado na economia é prejudicial, pois interfere no ajustamento espontâneo do mercado. Considerava também que as leis mercantis e o incremento da produção superavam os aspectos sociais e de qualidade de vida da população.

Após a grande depressão da década de 30, emerge a Teoria Keynesiana que estabeleceu como requisito para o crescimento econômico a intervenção, do Estado na economia no curto prazo. Essa Teoria estabeleceu que o crescimento econômico

possibilitaria a promoção do desenvolvimento econômico. Faz-se necessário entender ambos os conceitos em forma integrada, ou seja, na medida em que a economia desenvolve a tecnologia, a ciência e as políticas mercantis, deve também procurar melhoria de indicadores sociais (saúde, serviços básicos, segurança, etc.) e culturais que incidem diretamente na melhoria da qualidade de vida da população de uma nação.

No início da década de 70, surgem correntes de pensamento da economia ambiental que marcaram o início de uma nova concepção sobre o desenvolvimento, conhecida como desenvolvimento sustentável, cujo significado ainda se encontra em construção. No entanto, apresenta-se a seguir alguns dos enfoques propostos:

i) "... desenvolvimento sustentável significa atender as necessidades no presente, sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades..." (BRUNDTLAND, 1987).

ii) O desenvolvimento sustentável é entendido também, como um processo que muda de acordo com a dinâmica dos investimentos, inovações e uso dos recursos naturais. Para Sachs (2000), a sustentabilidade é um conceito dinâmico que considera as necessidades crescentes da população e têm como base nove dimensões principais:

a) A sustentabilidade social, vinculada a um padrão estável de crescimento, distribuição mais justa da renda e minimização das desigualdades sociais;

b) A cultural, que visa promover a realização de mudanças harmônicas com respeito aos padrões culturais vigentes;

c) A dimensão ecológica, relacionada ao uso eficiente dos recursos existentes nos ecossistemas causando um mínimo de prejuízo ambiental;

d) A dimensão geográfica, ligada à forma de distribuição populacional no planeta;

e) A econômica, vinculada ao fluxo de investimentos públicos e privados e ao correto uso e gestão dos recursos naturais;

f) A sustentabilidade ambiental, que permitiria a auto-depuração dos ecossistemas naturais;

g) A territorial, que procura a eliminação de diferenças inter-regionais, a igualdade no investimento público e a conservação da biodiversidade através do eco-desenvolvimento;

h) A sustentabilidade das políticas nacionais, relacionada a um nível aceitável de coesão social, democracia e capacidade institucional do Estado, com o objetivo de implementar um projeto de nação; e

i) Às políticas internacionais, a sustentabilidade está relacionada à garantia de paz mundial, assegurada pela ONU e pelo controle do sistema financeiro internacional, pela cooperação científica e pela redução das diferenças entre países do norte e do sul.

Nos últimos anos, o impacto social e ecológico da globalização vem sendo discutido extensivamente por acadêmicos e líderes comunitários. Suas análises demonstram que a nova economia está produzindo uma resultante de conseqüências interligadas e danosas - aumentando a desigualdade e a exclusão social, um colapso da democracia, deterioração mais rápida e abrangente do ambiente natural e ascensão da pobreza e alienação. De acordo com Capra (2003), o novo capitalismo global ameaça e destrói as comunidades locais por todo o planeta; tenta mudar diversidade em monocultura, ecologia em engenharia, e a própria vida numa “commodity”. Neste contexto surge nas últimas décadas a preocupação de se desenvolver um novo modelo de produção, crescimento e desenvolvimento. Entretanto, nos últimos anos, o termo “Desenvolvimento Sustentável” passou a ser usado, de forma exagerada e sem qualquer tipo de controle, de forma equivocada e indiscriminada, sem qualquer equacionamento mais profundo de suas bases. Da forma em que vem sendo praticado, o desenvolvimento sustentável não existe. O que existe segundo Bonalume (2009) é um desenvolvimento insustentável.

David Pearce et al. (1989) no trabalho “Blue Print for a Green Economy” afirmam que o “...Desenvolvimento Sustentável tornou-se um artigo de fé, uma prova ou exame: muitas vezes citado más pouco explicado”.

Com certeza, a discussão sobre o Desenvolvimento Sustentável continuará ainda por muito tempo. Para os fins deste trabalho, assume-se que o Desenvolvimento Sustentável é uma possibilidade; uma possibilidade de que tanto as gerações atuais como as futuras possam dispor dos recursos naturais necessários para a manutenção de sua existência material, física e espiritual.

2.1.2 Gestão dos recursos hídricos

Os recursos hídricos têm um lugar especial no contexto dos recursos naturais que existem no planeta. Isso se deve ao fato de que a água é vital para a vida na terra, importante no meio ambiente, e um elemento essencial à preservação da vida humana. A água é fundamental para a qualidade de vida e para o desenvolvimento socioeconômico dos povos (SHIKLOMANOV, 2000).

Nas décadas recentes, a sociedade tem tomado consciência de que os recursos naturais e particularmente os hídricos são limitados e em conseqüência, devem ser usados de forma racional e eficiente, procurando o desenvolvimento sustentável das sociedades humanas.

Segundo estimativas de Korzun (1978; 1974), a hidrosfera terrestre tem aproximadamente 1.386 milhões de quilômetros cúbicos (Km^3) de água. Não obstante, 97,5% desse total é água salgada, restando apenas um 2,5% de água doce. Dessas quantidades de água doce, 68,7% encontra-se na forma de gelo e neve nas regiões árticas, antárticas e montanhosas. Estima-se que 29,9% da água doce é água subterrânea, restando apenas 1,4% dessa água concentrada em lagos, reservatórios e rios. Constituindo esses últimos, as fontes mais acessíveis para satisfazer as necessidades econômicas dos seres humanos; porem imprescindíveis para a manutenção da vida nos ecossistemas aquáticos. Os valores citados conformam o que se conhece como recursos hídricos estáticos armazenados na hidrosfera.

A quantidade total de água na hidrosfera está composta pela água nos estados líquido, sólido e gasoso, encontrados na atmosfera, na superfície da terra e na parte subterrânea ate 2.000 metros de profundidade.

No longo prazo, só são considerados os montantes médios contidos nos corpos de água, aquíferos e atmosfera. No curto prazo (anos, estações, meses), os montantes armazenados na hidrosfera são intercambiados constantemente entre oceano, terra e atmosfera. Esse intercâmbio é conhecido como o ciclo hidrológico global (SHIKLOMANOV, 2000).

A água dos rios é muito importante para o ciclo hidrológico global e para o abastecimento de água doce as populações humanas. No referente a esse ciclo, o período total de recarga é de 2.500 anos para as águas dos oceanos; 10.000 anos para

o permafrost e o gelo polar e 1.500 anos para as águas subterrâneas e montanhas glaciais. A água armazenada nos lagos é repostada de forma completa em 17 anos, nos rios num período de 16 dias e na atmosfera em sete ou oito dias (KORZUN, 1978; 1974).

Para o manejo e administração da água, são usados freqüentemente dois conceitos quando se estuda esse recurso dentro de determinada região: i) o armazenamento estático da água doce, e ii) o conceito de recursos hídricos renováveis.

O primeiro deles considera a água doce que demora muitos anos ou décadas para se repor completamente (grandes lagos, água subterrânea, glaciais, etc.). Seu uso intensivo resulta inevitavelmente em diminuição do recurso com conseqüências ecológicas desfavoráveis, afetando os equilíbrios naturais conseguidos através de séculos. A recuperação destes equilíbrios demora dezenas ou centenas de anos.

O segundo conceito inclui a água que circula anualmente na terra. O volume de água renovável normalmente se calcula em volume por unidade de tempo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $\text{km}^3 \text{ano}^{-1}$) composto principalmente pelo escoamento regional e pelo fluxo de água subterrânea que ingressa na rede dos rios. Os recursos renováveis incluem também, a água repostada anualmente na parte superficial do aquífero subterrâneo, que não é drenada pelo sistema do rio (SHIKLOMANOV, 2000).

Dentro do processo de circulação da água são repostas a vazão do rio, e a qualidade da água, reduzindo-se a poluição dos rios, ao longo do tempo a água recupera sua pureza natural.

Dessa maneira, o componente mais importante do ciclo hidrológico é a vazão anual repostada nos rios. Essa vazão é muito importante para os ecossistemas terrestres, conseqüentemente para o desenvolvimento socioeconômico das sociedades humanas. Por intermédio dos rios é obtida a maior parte da água usada no mundo. Na prática a quantidade de água dos rios determina a disponibilidade ou déficit de água numa região.

Assim sendo, para medir os recursos hídricos renováveis é preciso determinar as fontes de água tanto espaciais como temporais (anualmente ou em períodos anuais), a

distribuição da vazão e a qualidade da água. Dessa maneira, estabelecem-se as bases para a determinação das possibilidades de uso e forma de preservação.

Identificar os fatores antrópicos que geram mudanças nos parâmetros de quantidade e qualidade da água dos rios e as análises de dados sobre os usos da água, são aspectos importantes para a medição dos recursos hídricos. Tal informação é necessária no processo de tomada de decisões, que levam a um uso ótimo dos recursos hídricos, no presente e no futuro. É importante que essa classe de análises seja realizada de forma regional, pois se torna um pré-requisito referente ao uso e gestão dos recursos hídricos e para o desenvolvimento de medidas de proteção destes recursos pelas atividades antrópicas.

2.1.2.1 Estudos sobre recursos hídricos

A preocupação com os recursos hídricos tem levado aos profissionais, formuladores de políticas, cientistas e acadêmicos que atuam na área, a unir esforços para gerar orientações que contribuam na correta abordagem da problemática da água. Uma aproximação importante a é a estimativa dos recursos hídricos que existem no planeta e seus diversos usos, a fim de ter uma noção das disponibilidades no futuro. Nos estudos de referência sobre este aspecto, podem ser citados aqueles desenvolvidos por Maidment et al. (2009); Gleick (1993; 1998; 2000); Shiklomanov (1997); L'Vovich (1979) e Baumgartner e Reichel (1975). A partir da perspectiva metodológica, os estudos citados têm efetuado estimativas quantitativas das características dos recursos hídricos renováveis, usando dados observados de vazões dos rios.

As características quantitativas associadas ao uso da água, na escala global foram determinadas, nos estudos citados, usando-se fatores como: grau de desenvolvimento socioeconômico, população e aspectos físicos e geográficos que incluem aspectos climáticos. As combinações destes fatores determinam o volume e características de usos da água, dinâmica e tendências futuras. No obstante, as relações entre fatores importantes não são evidenciadas de forma explícita, perdendo então a importância da dinâmica temporal e espacial. Portanto, as previsões futuras

sobre o uso da água e o balanço entre oferta e demanda do recurso, tornam-se difíceis e sujeitas a uma margem de erro muito grande (SIMONOVIC, 2002).

Dentre outros esforços realizados, é importante evidenciar os seguintes modelos de recursos hídricos, que consideram as interações dinâmicas que existem entre parâmetros quantitativos dos recursos hídricos disponíveis e os usos da água tais como:

i) O modelo PODIUM, desenvolvido pelo Internacional Water Management Institute (CGIAR, 2009); ii) O IMPACT, elaborado pelo International Food Policy Research Institute (THE INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE - IFPRI, 2009); iii) o modelo POLESTAR, desenvolvido no Stockholm Environment Institute (STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE - SEIB, 2009); iv) O WEAP, desenvolvido pelo Stockholm Environment Institute e pelo Boston Tellus Institute (BOSTON TELLUS INSTITUTE - TELLUS, 2009); v) O WATERGAP realizado na Universidad de Kassel (UNIVERSIDAD DE KASSEL - USF, 2009), e por último, vi) o modelo TARGETS, criado no Netherlands National Institute of Public Health and the Environment (NETHERLANDS NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT - RIVM, 2009).

De acordo com Simonovic (2002), em cada um dos modelos anteriormente citados, o problema dos recursos hídricos é abordado sob diferentes graus de especificação. As relações de retroalimentação dinâmica entre as características físicas da oferta hídrica disponível e o crescimento populacional, desenvolvimento da agricultura e da indústria, desenvolvimento tecnológico e uso de outros recursos naturais, não são evidenciados de forma explícita; portanto a utilidade desses modelos para o entendimento do impacto da água no desenvolvimento em grande escala é bastante limitado. Apesar das limitações, tais modelos têm recebido atenção de pesquisadores importantes como: Meadows e Jay W. Forrester e seus colaboradores na Sloan School of Management do Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT).

Por intermédio dos livros World Dynamics (FORRESTER, 1973; 1971) e Beyond the Limits (MEADOWS et al., 1992), muita atenção foi dada a modelagem global do planeta através do enfoque da dinâmica de sistemas, que permite avaliar consequências futuras sob condições de desenvolvimento do presente. Simulações

sobre o futuro têm sido efetuadas utilizando o modelo dinâmico World3 (MEADOWS et al., 1992). No entanto, estes estudos dão pouca atenção aos recursos hídricos, argumentando principalmente que a água é um recurso regional e não global (MEADOWS et al., 1992). Tal afirmação contrapõe-se à opinião da maioria dos cientistas da comunidade internacional que trabalham com recursos hídricos e que colocam ênfases na importância das diferenças regionais na resolução de conflitos em torno da água, que por sua vez, de forma clara evidenciam uma crise global (COSGROVE; RIJBERSMAN, 2000).

É importante esclarecer que os enfoques tradicionais na modelagem do balanço hídrico, não capturam o caráter dinâmico das principais variáveis que compõem os modelos, e seu efeito no futuro da água não é evidenciado. Não obstante, o enfoque de dinâmica de sistemas permite uma nova forma de modelar a dinâmica futura de sistemas complexos, razão pela qual dito enfoque é usado na modelagem do desenvolvimento mundial, por Meadows et al. (1974) e Forrester (1973; 1971), e em nível regional por Simonovic e Fahmy (1999) e Simonovic et al. (1997).

2.1.2.2 Situação da água doce no mundo

É evidente que o desenvolvimento humano precisa de água para todos os tipos de consumo tais como: tirar a sede humana, o uso na cozinha, higiene pessoal, até o consumo animal, abastecimento industrial e irrigação. E poucos exemplos de capital natural podem ser tão sintomáticos da limitação para o desenvolvimento, quanto à crescente redução da qualidade e da quantidade de água para as populações humanas nas diversas partes do globo.

Referente à situação dos recursos hídricos no mundo, o “Millenium Ecosystem Assessment” (VÖRÖSMARTY et al., 2005) trouxe como algumas das principais conclusões, a seguir:

i) O consumo humano global de água hoje é de aproximadamente 3.600 quilômetros cúbicos por ano. Em média, o uso de água nas diferentes regiões do globo, cresceu entre 15% a 32% nas últimas quatro décadas e estima-se que continue crescendo a taxas um pouco menores (10% de 2000 a 2010);

ii) Aproximadamente de 5% a 25% do uso de água doce global excede o fornecimento sustentável de longo prazo. Este excesso implica na utilização de transposições de bacias e uso de fontes subterrâneas não renováveis;

iii) O uso humano está danificando de forma irreversível o habitat das grandes bacias hidrográficas do mundo, competindo com os ecossistemas aquáticos e reduzindo sua viabilidade de suporte;

iv) O fornecimento de água doce continua sendo severamente impactado pelas mais diversas fontes de poluição em todo o mundo, especialmente pelas fontes urbanas e agrícolas;

v) A demanda humana para os mais diversos fins (energia, controle de enchentes, irrigação, abastecimento humano, etc.) encorajou a construção de represas e reservatórios em todo o mundo, comprometendo os ecossistemas aquáticos e sua capacidade de fornecimento dos serviços hidrológicos;

vi) A escassez de água é uma condição significativa e real para aproximadamente um a dois bilhões de pessoas em todo o mundo, levando a problemas com a produção de alimentos, saúde humana e desenvolvimento econômico;

vii) O custo anual de doenças derivadas da falta adequada de abastecimento de água e de saneamento soma aproximadamente 1,7 milhões de mortes;

viii) Quatro em cada cinco pessoas vive à jusante das fontes de água e são beneficiadas pelos serviços ambientais hidrológicos. Mais de um bilhão de pessoas vive sob restrições severas de fornecimento de água, e mais quatro bilhões vive em condições moderadas de fornecimento de água. Apenas 15% da população humana vive com relativa abundância relativa de água;

ix) Ecossistemas florestais e de montanha auxiliam grandemente no fornecimento de água doce no mundo, respectivamente 57% e 28%. Estes ecossistemas garantem água para aproximadamente quatro bilhões de pessoas (2/3 da população humana); e

x) Entre os principais fatores que influenciam a qualidade e a quantidade de água na escala de bacia são as mudanças na intensidade do uso do solo e da cobertura florestal original. Mudanças no uso do solo afetam a) a evapotranspiração, b) as taxas de infiltração de água no solo, e c) a quantidade e o tempo de escoamento superficial.

2.1.3 Capital natural, ecossistemas, serviços ecossistêmicos e valoração

Esta subseção apresenta os elementos teóricos que sustentam o enfoque ecossistêmico adotado para o desenvolvimento do modelo de simulação elaborado na presente investigação. Na primeira parte se apresentam os conceitos de capital natural, ecossistemas e serviços ecossistêmicos. Na segunda, se trata da valoração integral dos SE, que usa tanto modelos ecológicos como econômicos e sócio-culturais; por ultimo se apresenta um debate sobre os métodos para a valoração dos serviços antes citados.

2.1.3.1 Capital natural

Os recursos naturais, de acordo com Bellia (1996), são “os elementos naturais bióticos e abióticos de que dispõe o homem para satisfazer suas necessidades econômicas, sociais e culturais”. Então, o capital natural compreende todos estes recursos usados pela humanidade, tais como o solo, a água, a flora, a fauna, os minérios e o ar.

De acordo com o Millenium Ecosystem Assesment (2005), o conceito de desenvolvimento consiste em melhorar a qualidade de vida de qualquer sociedade humana. No entanto, isso não é possível sem o uso de um ativo básico chamado capital. O conceito de capital, no entanto, não é um conceito homogêneo. O capital pode ser dividido em pelo menos cinco formas principais (MA, 2005):

- i) Capital financeiro (dinheiro e substitutos);
- ii) Capital manufaturado pelo homem (construções, estradas, usinas, etc.)
- iii) Capital humano (esforços individuais e coletivos, capacidades humanas);
- iv) Capital social (instituições, relações, redes sociais, tradições culturais e religiosas etc.); e
- v) Capital natural, que considera o estoque de todos os recursos naturais que geram fluxo de benefícios tangíveis e intangíveis e são direta e indiretamente apropriáveis pelo homem. Engloba, assim, todos os recursos presentes no conjunto dos ecossistemas (FARLEY; GADDIS, 2007). Esse é o conceito principal da economia ecológica. O capital Natural ainda dividido em categorias: a) capital natural renovável (espécies vivas e ecossistemas); b) capital natural não renovável (petróleo, carvão, etc.); c) capital natural reciclável por médio da interação de longo prazo com

organismos vivos (atmosfera, água, solos férteis, etc.). O capital natural pode também ser considerado como fonte de matérias primas para a produção econômica (madeira, peixes, combustíveis fósseis). Como provedor de serviços ecossistêmicos, o capital natural serve na regulação climática, no fornecimento de água, e na capacidade de absorção de resíduos produzidos pelas sociedades humanas (FARLEY; GADDIS, 2007).

Os economistas ecológicos afirmam que o capital natural cada vez mais constitui-se no fator limitante da economia. Como no passado foi o capital manufaturado pelo homem (ARONSON et al., 2007).

Segundo Hawken, Lovins e Lovins (1999), se por um lado, os sistemas industriais atuais sob conseqüências da revolução industrial são capazes de criar e acumular grandes estoques de capital produzido pelo homem, por outro lado, o capital natural (bens e serviços) do qual depende a prosperidade econômica da humanidade, vem deteriorando-se rapidamente. Para os autores, anteriormente citados, a medida que a pressão sobre tal capital é maior, particularmente sobre os ecossistemas (base da produção dos serviços), há uma inversão de valores pois os limites da prosperidade humana tornam-se dependentes fundamentalmente do capital natural e não da capacidade industrial ou financeira da sociedade.

Tomando-se como base o exposto emerge, o conceito de Capital Natural Crítico (CNC) como sendo aquele que tanto a nível espacial como funcional é essencial à subsistência humana, e para o qual não existem substitutos adequados (FARLEY; GADDIS, 2007).

A identificação do CNC é importante, devido à quantidade de pontos de “não retorno” ecológico e da complexidade das relações ecológicas dentro dos distintos ecossistemas. As espécies individuais (que compõem o capital natural) apresentam pontos de “não retorno” com respeito à população mínima viável. No entanto os ecossistemas apresentam um tamanho mínimo viável abaixo do qual não conseguem realizar ou prover os serviços ecossistêmicos anteriormente produzidos. Para Norgaard (2006) citado em Blignaut et al. (2007), existem tantos pontos de “não retorno” interdependentes, tanto no nível espacial como histórico que só é possível prever alguns deles.

2.1.3.2 Ecossistemas

Hurtubia (1980) conceitua o ecossistema como sendo um sistema aberto integrado por todos os organismos vivos, inclusive o homem, e os elementos não vivos de um setor ambiental definido no tempo e no espaço. Este sistema possui propriedades globais de funcionamento (fluxo de energia e ciclagem da matéria) e auto-regulação (controle) derivam das relações entre todos os seus componentes, tanto pertencentes aos sistemas naturais, quanto aos criados ou modificados pelo Homem (FIGURA 1).

Figura 1 – Componentes de um ecossistema
Fonte: Duvigneaud (1974)

Em um ecossistema os elementos físicos e os elementos vivos estão unidos numa mesma área, coexistindo num processo de dependência, como os ecossistemas aquáticos e as vegetações ciliares (FIGURA 2).

Figura 2 – Perfil de um ecossistema formado pela mata ciliar e um riacho
 Fonte: Adaptado de Duvigneaud (1974)

Um ecossistema é uma unidade complexa composto por diversas formas de vida, populações e características. Contudo, sofre mudanças temporais, não sendo estático, tendo a capacidade inclusive de alterar a composição de sua biodiversidade. Isso porque a sua produção da matéria orgânica está intimamente ligada ao fluxo de energia, ao balanço hídrico e à reciclagem dos elementos minerais (SOUZA, 2008).

De acordo com Altieri (1999), a biodiversidade refere-se às espécies de plantas, animais e microrganismos existentes que interagem dentro de um ecossistema. Num agroecossistema, por exemplo, a manutenção ou incremento da biodiversidade natural auxilia na preservação do banco de germoplasma de espécies nativas, na reciclagem de nutrientes, no controle do microclima local, na regulação de processos hidrológicos, no equilíbrio entre organismos desejáveis e indesejáveis, entre outros fatores. Como se observa na FIGURA 3, a biodiversidade de um agroecossistema relaciona diversos componentes e funções do sistema, ampliando as possibilidades do manejo sustentável da área.

Figura 3 – Componentes, funções e métodos de manejo da biodiversidade em agroecossistemas
 Fonte: adaptado de Altieri (1999)

A biodiversidade é composta por diversos elementos ecológicos, que são componentes naturais, efetivos e constantes, de natureza estrutural e funcional, que integram e circunscrevem as condições inerentes ao desenvolvimento e à manutenção dos organismos vivos. De acordo com Fernandes (1998), alguns elementos podem eventualmente operar como fator dominante. Desde que afetem as condicionantes ambientais, por exemplo, a temperatura, provocará alteração de ordem climática, com efeito direto sobre as glaciações. Todos os elementos são partes integrantes do próprio equilíbrio ecológico e distribuem-se em três distintos conjuntos de elementos: i) Atmosféricos: Radiação Solar, Umidade e Temperatura; ii) Geofísicos: Solo e Água; e iii) Bióticos: Vegetais e Animais (SOUZA, 2008).

Os fatores ecológicos são representados por circunstâncias eventuais, por agentes ou por forças de natureza que modificam ou alteram os padrões constituintes do ambiente. São particularmente operacionais e, por vezes, atuam diretamente sobre os próprios organismos, regulando sua distribuição ou seu comportamento. Fatores ecológicos podem ser divididos em: i) geográficos; ii) geológicos; iii) atmosféricos; e iv) bióticos (FERNANDES, 1998).

Segundo esse mesmo autor, é importante compreender os significados das condicionantes ecológicas, principalmente os climáticos, na distribuição florística e no comportamento do vegetal, que representam o resultado mais provável das respostas biológicas. Os componentes se relacionam entre si e com o ambiente maior onde se localiza o ecossistema.

Deste processo de interação resultam os fluxos internos do sistema e deste com o ambiente externo. Sendo um sistema e atuando como um todo, qualquer interferência em um ou mais componentes afetará possivelmente todo o ecossistema, produzindo desequilíbrio nas forças biológicas que o sustentam.

A estabilidade de um sistema depende de uma interação complexa entre produção, consumo e ciclagem de gases, solutos e líquidos. Em um sistema natural, duas características são particularmente importantes para a avaliação de um processo de degradação: a capacidade de suporte e a biodiversidade (DIAS, 2003). Quanto maior for o tamanho e a complexidade estrutural do ecossistema, a tendência é que maior seja a sua biodiversidade.

Segundo Souza (2008) os principais processos responsáveis pela perda da biodiversidade são: i) perda e fragmentação dos habitantes; ii) introdução de espécies e doenças exóticas; c) exploração excessiva de espécies de plantas e animais; iii) uso de híbridos e monoculturas na agroindústria e nos processos de reflorestamento; iv) contaminação do solo, água e atmosfera por poluentes; e v) mudanças climáticas.

2.1.3.3 Serviços ecossistêmicos – SE

Para o entendimento da dinâmica dos ecossistemas é necessário entender o que são as funções ecossistêmicas, as quais podem ser definidas como sendo as constantes interações existentes entre os elementos estruturais de um ecossistema, incluindo transferência de energia, ciclagem de nutrientes, regulação de gás, regulação climática e do ciclo da água (FARLEY; DALY, 2003). Tais funções, consideradas um subconjunto dos processos ecológicos e das estruturas ecossistêmicas (DE GROOT et al., 2002), criam uma verdadeira integridade sistêmica dentro dos ecossistemas, criando um todo maior que o somatório das partes individuais.

O conceito de funções ecossistêmicas é relevante no sentido de que por meio delas se dá a geração dos chamados serviços ecossistêmicos, que são os benefícios diretos e indiretos obtidos pelo homem a partir dos ecossistemas. Dentre eles pode-se citar a provisão de alimentos, a regulação climática, a formação do solo, etc. (MA, 2003; DE GROOT et al., 2002; DAILY, 1997; COSTANZA et al.; 1997).

De forma sintética, as funções ecossistêmicas podem ser definidas como sendo: fluxos de materiais, energia e informações derivados dos estoques de capital natural (ecossistemas naturais e cultivados) que combinados com os demais tipos de capital (humano, manufaturado e social) produzem o bem-estar humano. Tal como no caso dos ecossistemas, o conceito de serviços ecossistêmicos é relativamente recente, sendo utilizado pela primeira vez no fim da década de 1960 (HELLIWELL, 1969; KING, 1966).

Freqüentemente os SE são classificados de acordo as suas características funcionais, organizacionais e/ou descritivas. Norberg (1999) propõe classificar os serviços ecossistêmicos em três categorias principais:

i) A primeira categoria compreende aqueles serviços associados a determinadas espécies ou grupo de espécies similares, em que os possíveis beneficiários são internos ao próprio ecossistema em que os serviços são gerados;

ii) A segunda compreende os serviços que regulam inputs externos de natureza física ou química. A conservação dos serviços envolve a preservação de toda a comunidade biótica e de todo o ecossistema, demonstrando o delicado equilíbrio entre os componentes estruturais de um ecossistema; e

iii) A terceira categoria inclui os serviços relacionados à organização de entidades bióticas e à organização biológica dos componentes ecossistêmicos. Os serviços derivados de tais processos podem ser chamados de serviços de suporte, uma vez que alicerçam a geração dos demais serviços e é de fundamental importância para o funcionamento sistêmico dos ecossistemas e para sua habilidade de adaptação a situações adversas.

O Millenium Ecosystem Assesment (MA, 2005), como definido na introdução ao presente trabalho, propõe uma classificação dividida em quatro categorias: i) serviços

de provisão (ou serviços de abastecimento); ii) serviços de regulação; iii) serviços culturais; e iv) serviços de suporte (FIGURA 4).

Figura 4 – Serviços ecossistêmicos por categoria

Fonte: Adaptado da Avaliação dos ecossistemas do Milênio, Ecosystems and human well-being: a framework for assessment – MA, (2003)

i) Os serviços de provisão incluem os produtos obtidos dos ecossistemas, tais como alimentos e fibras, madeira para combustível e outros materiais que servem como fonte de energia, recursos genéticos, produtos bioquímicos, medicinais e farmacêuticos, recursos ornamentais e água. Sua sustentabilidade não deve ser medida apenas em termos de fluxos (quantidade de produtos obtidos em determinado período). Deve-se proceder a uma análise que considere a qualidade e o estado do estoque do capital

natural que serve como base para sua geração, atentando para restrições quanto à sustentabilidade ecológica. Faz-se necessário observar os limites impostos pela capacidade de suporte física, química e biológica do ambiente natural, de maneira que a intervenção antrópica não comprometa irreversivelmente a integridade e o funcionamento apropriado dos processos naturais.

ii) Quanto aos serviços de regulação, estes se relacionam às características regulatórias dos processos ecossistêmicos, como manutenção da qualidade do ar, regulação climática, controle de erosão, purificação de água, tratamento de resíduos, regulação de doenças humanas, regulação biológica, polinização e proteção de desastres (mitigação de danos naturais), sendo derivados quase que exclusivamente das funções ecossistêmicas classificadas na categoria de regulação, discutidas anteriormente. Diferentemente dos serviços de provisão, sua avaliação não se dá pelo seu “nível” de produção, mas sim pela análise da capacidade dos ecossistemas regularem determinados serviços.

iii) Os serviços culturais incluem a diversidade cultural de um povo ou sociedade, na medida em que a própria diversidade dos ecossistemas influencia a multiplicidade das culturas, valores religiosos e espirituais, geração de conhecimento (formal e tradicional), valores educacionais e estéticos, etc. Estes serviços estão intimamente ligados a valores e comportamentos humanos, bem como às instituições e padrões sociais, características que fazem com que a percepção dos mesmos seja contingente a diferentes grupos de indivíduos, dificultando sobremaneira a avaliação de sua oferta.

iv) Os serviços de suporte são aqueles necessários para a produção dos outros serviços ecossistêmicos. Eles se diferenciam das demais categorias na medida em que seus impactos sobre o homem são indiretos e/ou ocorrem no longo prazo. Como exemplos, pode-se citar a produção primária, produção de oxigênio atmosférico, formação e retenção de solo, ciclagem de nutrientes, ciclagem da água e provisão de habitat.

Como resultado da degradação dos ecossistemas, a ameaça de alterações drásticas nos fluxos de serviços ecossistêmicos tem crescentemente preocupado a comunidade acadêmica e os tomadores de decisão. Devido à importância que tais fluxos têm para o bem estar humano e para a manutenção da vida no planeta é que

existe consenso na necessidade de sua valoração. É preciso conhecer de que forma, as mudanças nos fluxos de serviços ecossistêmicos afetam a capacidade humana de satisfazer suas necessidades materiais e/ou imateriais.

No local de estudo escolhido está sendo implementado um projeto de pagamentos por serviços ambientais hídricos, sendo importante a análise dos efeitos que a mudança na cobertura vegetal (uso do solo) tem sobre a capacidade de fornecer SE vinculados à quantidade de água retida na superfície, infiltrada e armazenada.

2.1.3.4 Valoração do capital natural

De acordo com Daily et al. (2000) e Bockstael et al. (2000), em termos econômico-financeiros o valor de todo estoque de capital é dado pelo valor presente dos fluxos de renda futura por ele gerados. Considerando que os ecossistemas são estoques de capital natural, tem-se que seu valor também é definido pelo valor presente dos fluxos de renda natural futura providos, sendo que, no caso dos ecossistemas, tais fluxos equivalem aos serviços ecossistêmicos (DAILY et al., 2000; BOCKSTAEEL et al., 2000).

O exercício de valorar os ecossistemas significa, portanto, captar o valor dos serviços por ele gerados. Em sentido corrente, “valor” expressa a magnitude pela qual um determinado bem ou serviço contribui para um determinado objetivo pré-estabelecido (BOCKSTAEEL et al., 2000; COSTANZA, 2000; BINGHAM et al., 1997).

Não obstante, a ciência econômica preocupe-se com a idéia de valor. Estes são comumente expressos por preços que muitas vezes não refletem a real importância que um bem o serviço tem. Embora os preços de mercado não sejam equivalentes a valores, cujo sentido ultrapassa a esfera econômica, a valoração econômica trabalha principalmente com preços de mercado, demonstrando um viés parcial, antropocêntrico e utilitário, privilegiando apenas a dimensão econômica dos valores associados aos ecossistemas.

Ainda se discute a pertinência da valoração dos serviços fornecidos pela natureza, no entanto, parece existir um relativo consenso sobre a necessidade da valoração dos serviços fornecidos pelos ecossistemas, em virtude do reconhecimento da existência de “valores” associados aos benefícios oriundos dos processos naturais subjacentes à dinâmica ecossistêmica e ao fato de que o ser humano se depara diariamente com

intercâmbios os quais levam à escolhas e, ao final, à necessidade de atribuição de valores (BARBIER; HEAL, 2008; AMAZONAS, 2006; HERENDEEN, 1998; COSTANZA et al., 1998).

Ecossistemas e seus serviços (provisão, regulação, sustento e serviços culturais) têm valor no sentido econômico para a sociedade na medida em que o homem, direta e indiretamente, deriva utilidade do seu uso efetivo ou potencial. Esta abordagem de valoração, conhecida como antropocêntrica, associa, pois, o valor dos fluxos de serviços ecossistêmicos a valores econômicos, dando uma idéia de valor instrumental aos serviços dos ecossistemas. Além de utilidade, a sociedade também associa valores ecológicos, socioculturais e intrínsecos ligados à existência de ecossistemas (MA, 2003). Tais abordagens, embora menos comuns, são importantes, uma vez que tentam captar não apenas os valores instrumentais ligados aos ecossistemas, mas também procuram superar o reducionismo de se expressar os valores dos serviços ecossistêmicos baseados apenas nas preferências individuais.

Na seqüência, serão apresentados os métodos de valoração mais utilizados para avaliar serviços ecossistêmicos. Além de apresentar as metodologias usadas pela economia ambiental e pela economia ecológica, apresenta-se um enfoque conhecido como valoração integral que tem por objetivo evidenciar de forma explícita a inter-relação existente entre ecossistemas, economia e sociedade.

2.1.3.5 Métodos de valoração de serviços ecossistêmicos

2.1.3.5.1 Considerações

De acordo com Wunder (2005), um Programa de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos pode ser definido como: uma transação voluntária onde; um SE (ou um uso de solo que claramente seja capaz de gerar aquele serviço) bem definido; é comprado por pelo menos um comprador de SE e é vendido por pelo menos um vendedor de SE, se e apenas se, o vendedor de fato entregar o serviço. Pelo que estabelecer mecanismos adequados de PSE, podem ser ferramentas que contribuíam para implementar formas de incentivo a proteção e conservação dos recursos naturais, a produção sustentável e a melhorar as condições de vida dos produtores rurais.

Para a implementação desses mecanismos, é preciso que tanto os beneficiários dos SE, como aqueles que fomentam e possibilitam a geração dos mesmos, reconheçam: tanto importância destes serviços, como também a identificação e a valoração econômica, ecológica e sociocultural dos mesmos, a determinação dos montantes de pago, e o estabelecimento de mecanismos institucionais adequados para o gerenciamento dos recursos financeiros.

Tanto a valoração econômica como a valoração ecológica e a sociocultural são processos que podem contribuir de forma importante ao estabelecimento de critérios que permitam estabelecer montantes justos de compensação por SE.

Na presente seção, abordam-se aspectos teóricos que concernem às metodologias de valoração dos SE (valoração econômica, ecológica e integral).

Por que valorar os serviços ecossistêmicos?

O meio rural é fundamental para a provisão de bens e SE tais como a produção de alimentos, matérias primas agrícolas e florestais, a regulação e renovação da água, a proteção e conservação da biodiversidade, a beleza cênica e a retirada de carbono da atmosfera. Em diversos países e no Brasil existem processos de reconhecimento dos benefícios gerados pelos SE nas áreas rurais e sua importância dentro das estratégias que visam o desenvolvimento sustentável. Este reconhecimento implica na valoração destes serviços a fim de poder outorgarem-lhes um valor de mercado como se vem fazendo com aqueles bens e serviços de aproveitamento direto, tangíveis e que já contam com mercados reais para sua comercialização.

Neste contexto a estimação do valor econômico, ecológico e sociocultural dos SE se constitui num fator estratégico. Muitas das decisões concernentes ao desenvolvimento de um território embasam-se em critérios de caráter econômico. No entanto, a valoração integral dos SE permite a definição de parâmetros tanto econômicos como ecológicos e socioculturais que permitam comparar escolhas alternativas ou complementares que explicitem os benefícios monetários, ecológicos e socioculturais produzidos por estes serviços.

O PSE é um reconhecimento ao esforço do produtor no que diz respeito às práticas culturais utilizadas na produção dos bens agrícolas que comercializa no mercado, assim como dos SE. Deve ser um mecanismo de longo prazo que assegure

um fluxo sustentável de SE. A implementação de um esquema de PSE deve basear-se num marco conceitual (FIGURA 5) que permita identificar os principais processos que ocorrem nos ecossistemas, e que se pressupõe provêm os diferentes serviços. Nesse sentido, De Groot et al. (2002) propõem um marco conceitual que permite classificar, descrever e avaliar as funções, os bens e os serviços dos ecossistemas.

Figura 5 – Marco conceitual sobre bens e serviços ecossistêmicos
Fonte: adaptado de De Goot et al. (2002)

Sob essa perspectiva, de acordo com De Groot et al. (2002), definem-se como funções do ecossistema “à capacidade dos processos naturais e componentes de prover bens e serviços que satisfazem às necessidades humanas, direta o indiretamente”. Cada função é o resultado dos processos naturais do subsistema ecológico do qual forma parte. Por outro lado, os processos naturais resultam das complexas interações entre os componentes bióticos e abióticos dos ecossistemas a través das forças universais de controle de matéria e energia.

As funções dos ecossistemas de regulação, habitat, produção e informação geram o conjunto de serviços e bens ambientais que podem ser avaliados desde diferentes enfoques (ecológico, sociocultural e econômico) e que determinam os processos de tomada de decisões. De acordo com o marco conceitual de De Groot et al. (2002) um PSE fica incluído como uma das opções de política e medida de manejo. A

repercussão dessa política como a de qualquer outra tem efeitos não só nas funções do ecossistema que gera os SE e que seriam as que interessam ao PSE, como também em outros processos e estruturas do sistema.

Para a implementação de um programa de PSE é importante em cada caso: i) a identificação do SE, ii) a unidade geográfica de análise, iii) a unidade social de análise e a identificação dos atores principais (provedores e beneficiários), iv) os métodos empregados na avaliação biofísica do serviço ecossistêmico (valoração ecológica da oferta ambiental), v) os métodos utilizados para a valoração econômica tanto por parte dos atores envolvidos como dos modelos teóricos, vi) os valores culturais envolvidos na percepção do SE, e vii) identificar os fatores de risco principais que prejudicam a capacidade dos ecossistemas de prover os SE (DE GROOT, 2002).

Landell-Mills e Porras (2002), afirmam que os serviços ecossistêmicos devem ser analisados desde o enfoque da oferta natural destes a uma unidade geográfica funcional. O que permitirá a identificação das relações entre os protagonistas principais na gestão do território. Para Kiersch (2009), o mencionado anteriormente facilita a avaliação dos impactos das atividades socioeconômicas na qualidade dos ecossistemas e o efeito na capacidade dos mesmos de fazer as funções relacionadas à geração dos serviços.

2.1.3.5.2 Valoração dos bens e serviços ecossistêmicos

No âmbito da economia têm-se duas perspectivas teóricas para a valoração dos bens e serviços ecossistêmicos: o enfoque da Economia Ambiental e o Enfoque da Economia Ecológica.

i) Metodologias de valoração da economia ambiental

A Economia Ambiental considera que a utilidade dos ativos ambientais compreende uma série de valores diferentes. Antes de se utilizar qualquer método de valoração, devem-se identificar quais são os valores que contêm um determinado ativo ambiental e que determinam seu valor econômico total determinam a classe de método de valoração a ser usado, como pode ver-se na FIGURA 6 (BARBIER et al., 1997).

Figura 6 – Valor econômico total e métodos de valoração propostos pela economia ambiental
 Fonte: Adaptado de Barbier et al. (1997)

A Economia Ambiental utiliza diferentes métodos para a criação de mercados substitutos para os bens e serviços ecossistêmicos que não têm mercados reais.

Nos mercados reais o parâmetro indicativo do valor dos recursos naturais são os preços de mercado. Tais preços podem ser determinados através de análises de mercado, da função de produção, custos de reposição, restauração etc. Quando não existam mercados reais para os bens e serviços ambientais o que se tem que fazer é a criação de um mercado substituto e assim obter uma curva de demanda hipotética. Entre as técnicas mais usadas para essa finalidade tem-se:

a) O custo da viagem

Usado na valoração dos serviços recreativos que oferece a natureza, são os custos que acontecem quando uma pessoa tem que se deslocar a um determinado local para desfrutar dos serviços de recreação que oferece o local em questão. A função de demanda é obtida através da propensão média a visitar a área, que se

constituirá na variável dependente e o custo da viagem, que será a variável independente, assim poderá ser ajustada uma regressão estatística que determinará a curva de demanda.

Na estimação da demanda do bem em estudo usam-se freqüentemente três formas: o custo da viagem zonal, o custo da viagem individual, e os modelos de eleição discreta.

O custo da viagem zonal se realiza através de uma entrevista in situ, donde se identifica de onde o visitante vem, e o custo se vincula estatisticamente a sua população de origem. Determinando-se uma media de custo por zona.

O custo da viagem individual é determinado através de uma entrevista ao visitante. O que se pretende é conhecer o custo que teve que ser feito para chegar ao local em questão, determinam-se também as características socioeconômicas familiares e o numero de visitas feitas anualmente ao local. Isto é feito no lugar.

Os modelos de eleição discreta buscam determinar a demanda individual do serviço objeto de estudo em base as suas características diferenciais.

b) Os preços hedônicos

De acordo com Azqueta (2002), esta técnica usa-se o preço de um determinado ativo como o indicador do valor de um atributo com o componente ambiental ou sem ele. Neste caso o ativo ambiental é uma das características do bem. Mediante os preços hedônicos tenta-se identificar todos os atributos do bem que explicam seu preço, e discriminam sua importância quantitativa.

c) Método custo de reposição

A idéia básica desse método é que a valoração ambiental pode usar como referência o valor do custo para reparar ou restaurar o prejuízo ambiental.

d) O custo de prevenção de danos

Consiste em valorar os serviços ecológicos partindo do gasto que se tem que ser feito para evitar seu desaparecimento ou deterioração.

e) O custo de conservação

Fundamenta-se na determinação do gasto necessário para conservar um lugar ou a uma espécie.

f) Método dose-resposta

Esse método procura estabelecer um relacionamento entre variáveis que retratam a qualidade ambiental e o nível do produto de mercado em termos de quantidade e/ou qualidade. Há uma forte dependência desse método com as informações oriundas das ciências naturais para aplicação de modelos econômicos. A idéia subjacente a esse método é bem ilustrada através do exemplo de uma cultura agrícola. Suponha uma área destinada ao cultivo que apresente erosão do solo. Para diferentes níveis de erosão, existirão diferentes níveis de produção final. Isto é, para cada “dose” de erosão do solo, existirá uma “resposta” em termos de redução na quantidade produzida da cultura. Alternativamente, podem-se utilizar os custos de reposição dos nutrientes que se perdem com a erosão de solo. Essa perda pode ser aproximada pela aplicação de fertilizantes químicos que possuem valores de mercado explícitos.

Os métodos usados pela Economia Ambiental, para simular um mercado hipotético, no caso dos bens e serviços ambientais que não contem com um mercado real, partem da elaboração de uma entrevista mediante a qual se cria uma situação semelhante a um mercado. Como as técnicas são usadas:

a) A valoração contingente

Para Azqueta (2002), através da realização de entrevistas individuais pode-se atribuir um determinado valor ao bem ou serviço ambiental. Fundamentado em dois tipos de análises: Disposição a Pagar (DAP) e, Disposição a ser Compensado (DAC).

Essa metodologia compreende a realização de entrevistas ou questionários através dos quais se pretende determinar o preço que a pessoa entrevistada estaria disposta a pagar pelo bem ou serviço ambiental que se está querendo valorar. Os resultados destas entrevistas possibilitaram a construção de um mercado hipotético, o qual pretende representar a demanda de estes bens e serviços por parte da sociedade.

b) Método da preferência revelada

Este método se encontra nas etapas iniciais de desenvolvimento e pretende melhorar o processo de valoração direta, através da obtenção de respostas respeito de um número maior de características do bem ou serviço a ser valorado (ADAMOWICZ, 1994; LOUVIERE, 1994).

ii) Metodologias de valoração da economia ecológica

Segundo Farley e Daly (2003), a economia ecológica, como disciplina, aparece com mais força na década de 80, a partir da percepção das áreas de ciências econômicas e ecológicas. Apóia-se na idéia que as políticas de meio ambiente cada vez mais seriam dependentes e se beneficiariam do pensamento tratado de forma conjunta entre estas duas ciências e não de forma separada como vem se dando.

De acordo com Costanza (1994, p. 111):

*“... a Economia Ecológica é uma nova abordagem transdisciplinar que contempla toda a gama de inter-relacionamentos entre os sistemas econômico e ecológico”.
“...engloba e transcende esses limites disciplinares e vê a economia humana como parte de um todo superior. Seu domínio é a totalidade da rede de interações entre os setores econômico e ecológico”.*

Conceitualmente, este ramo da economia surge a partir do reconhecimento do papel do fluxo de energia na economia humana, a qual através da crescente entropia, com a aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica, em algum momento iria impor limites ao crescimento econômico (GEORGESCU-ROEGEN, 1971, citado em MAY 1995). Segundo o enfoque de Georgescu-Roegen, os diagramas de fluxo circular entre os agentes do sistema econômico: produtores e consumidores (FIGURA 7) desconsideram os fluxos de energia e materiais através do sistema. Na verdade, esse diagrama não é circular, há um fluxo de mão única (fluxo entrópico), que começa com os recursos (matéria-energia) e termina com os resíduos (matéria-energia); qualitativamente diferentes.

Figura 7 – Diagrama de fluxo circular entre agentes econômicos
 Fonte: Penteado (2005)

Boulding (1966) chama a atenção para a transição da antiga “economia de fronteira”, onde o crescimento econômico estava atrelado ao consumo de recursos, para a atual “economia da nave espacial”, onde o crescimento do bem estar de uma sociedade não pode mais ser alimentado pelo crescimento do consumo material. Esta é idéia fundamental para a elaboração da chamada “economia do estado estacionário” (FARLEY; DALY, 2003), no qual o autor desenvolveu o conceito de que dado o caráter finito da Terra, a atividade econômica humana só pode ser vista como uma sub-parte deste sistema global finito e por isto, do ponto de vista material, não pode crescer indefinidamente.

Enquanto a economia neoclássica tem na alocação eficiente dos recursos, o seu principal critério econômico, a economia ecológica, apesar de também considerar importante à alocação considera-a secundária em relação a outros dois pontos centrais na economia, a escala e a distribuição (FARLEY; GADDIS, 2007).

Preocupada com a relação entre os sistemas econômicos e os sistemas ecológicos que os sustentam e os contém, a economia ecológica aponta para a necessidade de determinação de uma escala sustentável, ou seja, a existência de um estoque de capital natural que seja capaz de suportar as funções ecossistêmicas básicas, assim como o fornecimento de matérias-primas e a capacidade de absorção dos resíduos gerados pelas atividades econômicas ao longo do tempo. Neste aspecto qualquer crescimento econômico, que vá além do ponto onde os custos ecológicos

superem os benefícios econômicos é ineficiente e excede a escala desejável. Dito de outra forma, os limites ao crescimento fundamentados na escassez dos recursos naturais são reais e não necessariamente superáveis através do progresso tecnológico. A escala sustentável é aquela que se adapta de forma gradativa às inovações tecnológicas, de modo que a capacidade de suporte não se reduz através do tempo (DALY, 1992, citado em MAY, 1995).

A distribuição refere-se à divisão relativa dos fluxos de recursos entre os diferentes atores da sociedade, incluindo as futuras gerações, no qual a equidade na partição dos recursos é uma questão central para a economia ecológica. Nesta questão, já apontando para um dos itens centrais dos PSE, uma distribuição justa seria aquela, onde os indivíduos que excedem a escala desejável de uso dos recursos naturais, ou aqueles que vão se beneficiar das restaurações das funções ecossistêmicas sejam aqueles que pagaram economicamente por isto.

Dessa maneira, a Economia Ecológica propõe dois grupos principais de métodos de valoração: os métodos energéticos (comensuráveis) e, os métodos de tomada de decisões (incomensuráveis).

a) Análise energética

O IFIAS (1974) define a análise energética como sendo “o *processo de determinação da energia requerida de forma direta e indireta para que dado sistema produza determinado bem ou serviço.*” É uma análise do tipo intuitivo e genérico, feito por meio da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica. Ao analisar a energia, seu objetivo central é a quantificação da relação entre as atividades humanas e as demandas de energia ou recursos. Não busca estabelecer um valor dos ativos ambientais (BROWN; HERENDEEN 1996).

Esta proposta parte do pressuposto que existe um balanço de energia incorporado em todo o processo.

Entre as ferramentas empregadas para solucionar os problemas ambientais e aumentar a eficiência nos processos produtivos, que usam este enfoque estão: a análise do ciclo de vida, as avaliações do ciclo de vida e as análises exergéticas, (HAU; BAKSHI, 2007; BAKSHI, 2002).

b) Análise emergética: (Emergy Analysys)

Odum (1996; 1988) estruturou a análise emergética. Trata-se de uma metodologia de valoração centrada na emergia indispensável para gerar um bem ou serviço e fundamentada na Teoria Geral de Sistemas proposta por Bertalanffy (1976) e nas Leis Energéticas de Lotka (1925) assim como também na Ecologia e na Energética de Sistemas, desenvolvida por Odum (1988).

Neste caso o que se pretende é calcular a quantidade de energia de qualidade similar (emergia), usada de forma direta ou indireta para produzir um serviço ambiental. O conceito de emergia deriva da idéia da Memória Energética (Energy Memory), refere-se ao montante de energia standard.

Emprega o conceito da transformicidade, que é um fator usado para padronizar as diferentes qualidades de emergia. Também usa o princípio da maximização da emergia que baseia-se no princípio que os sistemas mais competitivos são aqueles que obtêm o benefício máximo da emergia existente, através dos fluxos de retroalimentação de seus processos produtivos, convertendo a maior parte da emergia em trabalho útil e organizando eficientemente seus componentes.

Esta metodologia utilizada consiste na quantificação dos fluxos emergéticos, nos diferentes elementos, que conformam o sistema seguindo estas etapas:

- b.1) Construção de um Diagrama de Fluxo;
- b.2) Construção de uma Tabela de Análise Emergético;
- b.3) Cálculo dos Índices de Estado.
- c) Análise multicritério

Nesta metodologia empregam-se procedimentos matemáticos de agregação de critérios para estabelecer uma lógica na tomada de decisões. Baseia-se no Princípio da Comensurabilidade Fraca. Usa uma escala ordinal de medida e se enquadra dentro da Ciência Post-normal. A solução dos problemas reais neste enfoque deve ser multicritério, dividindo-se, segundo Munda (2007), nas partes a seguir:

Definição e estruturação do problema (formulação matemática), Seleção de critérios de avaliação; Eleição entre métodos contínuos o discretos; e Eleição de mecanismos de agregação de critérios.

Costanza et al. (1997), resumem de forma comparativa os enfoques da economia ambiental e da economia ecológica (TABELA 1).

Tabela 1 – Enfoques da economia ambiental e da economia ecológica comparativamente

FATOR	ECONOMIA AMBIENTAL	ECONOMIA ECOLÓGICA
Perspectiva de atuação	Mecânica, estática, atômica. Preferências individuais como força dominante. Substituição perfeita.	Dinâmica, sistêmica, evolutiva e termodinâmica. Complexidade, limites ecológicos, sustentabilidade.
Escala temporal de análises	Curto prazo.	Multiescalar
Escala espacial de análises	Administrativa e institucional: de local a internacional. Seleciona de acordo ao tipo de problema.	Ecológica e administrativa: de local a global Hierarquia de escalas. Seleciona de acordo ao tipo de problema e ecossistema.
Âmbito de aplicação	Natureza como tela de fundo.	Ecossistemas na sua totalidade, inclui o ser humano (socioecossistema)
Objetivo principal macro escala	Crescimento da economia nacional. Alocação eficiente dos recursos. Objetivos macros a partir de objetivos micros.	Sustentabilidade de socioecossistemas.
Objetivo principal micro escala	Maximização de benefícios Custos externos não são considerados sempre.	Depende do âmbito e objeto de estudo.
Predições acerca do desenvolvimento tecnológico	Otimismo tecnológico.	Ceticismo tecnológico.
Enfoque acadêmico	Economistas.	No mínimo ecólogos e economistas.
Corpo de Conhecimento	Economia.	Ecologia de Sistemas e Economia.
Objetivo de gestão	Bens e serviços ecossistêmicos.	Funções dos ecossistemas que geram bens e serviços.
Conceito de valor	Dado pelo mercado.	Teoria energética do valor (métodos energéticos).
Objetivos e procedimentos da valoração econômica	De forma setorial os diferentes bens públicos. Com componente social e análises das preferências. Incorpora externalidades ambientais ao sistema econômico.	De forma sistêmica as funções e serviços ambientais. Sem componente social e sem análises das preferências. Não reconhece o conceito de externalidade ambiental.

Fonte: Costanza et al. (1997)

iii) Valoração integral

A valoração dos serviços que aportam os ecossistemas é uma estimação de caráter subjetivo no que se refere aos benefícios que trazem na satisfação das necessidades ou do bem-estar social ou individual (GATTO; DE LEO 2000). A relevância dos SE para a sociedade depende muito da disciplina de análise, dos interesses individuais, da valoração que a sociedade dá ao SE específico, e da informação que se tenha para a valoração do SE.

De forma sintética, De Groot et al. (2002) reconhecem que na atualidade conta-se com três enfoques distintos para a valoração dos ecossistemas e seus serviços:

a) A valoração de caráter ecológico, que estuda os processos ecossistêmicos mais importantes que resultam das inter-relações entre os elementos bióticos e abióticos que provêm SE;

b) A valoração econômica, preocupada por estimar a contribuição dos ecossistemas ao bem estar humano e ao desenvolvimento econômico dos territórios; e

c) A valoração sociocultural, focada no valor que alguns elementos da paisagem tem para a sociedade de acordo com suas concepções socioculturais da natureza.

E necessário evidenciar que valorar os serviços ecossistêmicos a partir de uma ou outra perspectiva converte-se em uma limitante. Não permite a compreensão da interdependência que existe entre a qualidade dos ecossistemas e sua capacidade de provisão dos SE no tempo e no espaço.

Dessa forma, desde que seja possível, o ideal é efetuar uma valoração integral dos SE seguindo o esquema representado na FIGURA 8.

Figura 8 – Esquema para avaliar serviços ecossistêmicos
 Fonte: Adaptado de De Groot (2002)

2.1.3.6 Valoração ecológica e modelos de simulação

A ferramenta utilizada para a valoração ecológica dos SE, seguindo a metodologia da análise multicritério descrita anteriormente, usa modelos de simulação baseados em processos ecossistêmicos.

O primeiro passo para a representação dos ecossistemas é a compreensão mínima de como estes se organizam internamente e quais são suas tendências gerais de evolução e sobrevivência. Um panorama geral da teoria de ecossistemas pode ser encontrado em Jorgensen (1992), o qual apresenta os princípios gerais que regem o seu funcionamento. Do ponto de vista da valoração ecológica, o conhecimento de tais princípios é de fundamental importância, uma vez que estes contribuem para a compreensão das tendências de movimentos dos ecossistemas. A partir daí, pode-se ter uma maior clareza dos fenômenos e reações ocorridas nas interações entre os ecossistemas e demais sistemas.

A partir dos princípios gerais de funcionamento, pode-se estruturar a representação dos ecossistemas, a qual tem sido feita por meio da construção de modelos ecossistêmicos (ou ecológicos). De maneira mais simples, um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade (VOINOV, 2008), na qual são descritas as interações que se consideram mais importantes para representar o funcionamento de um ecossistema. Com efeito, o ponto de partida fundamental para a modelagem ecossistêmica é a seleção de seus componentes e processos ecologicamente mais relevantes sem prejuízo para a compreensão básica de sua estrutura e dinâmica (GOMES; VARRIALE, 2004). Para Wätzold et al. (2006), um modelo pode ser descrito como uma representação proposital de um sistema, o qual consiste em elementos estruturais e suas relações internas, além de inter-relações destes com os ambientes subjacentes. As especificações dos elementos estruturais e dos relacionamentos internos e externos determinam em que medida um modelo pode ser considerado integrado e interdisciplinar.

A construção dos modelos deve necessariamente usar uma abordagem sistêmica (BERTALANFFY, 1976). Para Voinov (2008). Um sistema pode ser definido como uma combinação de elementos que interagem e produzem uma nova “qualidade” produto dessa interação. Tal definição pressupõe a existência de três características básicas dos sistemas: i) suas partes ou elementos; ii) as interações que ocorrem entre seus elementos; e iii) o resultado dessas interações ou a “nova qualidade”. Quando se considera a existência de interações entre partes distintas de um todo, implicitamente está-se considerando a existência de pelo menos duas entidades presentes dentro dessa realidade, as quais devem possuir propriedades próprias e distintas do todo ao qual pertencem, o que permite uma análise individualizada de cada uma. Por fim, a interação ou combinação das várias entidades presentes deve proporcionar uma nova configuração da realidade que se está estudando. Os modelos, em última instância, são utilizados para entender-se a natureza dessa nova qualidade produzida a partir da dinâmica interna aos sistemas.

Se os modelos são representações simplificadas de determinado ecossistema, detalhes sobre sua estrutura e funcionamento necessariamente deverão ser omitidos/ignorados em seu processo de construção. Em função disso, os

resultados/predições dos modelos provavelmente jamais coincidirão com o comportamento do mundo real, o que não invalida a utilização dessa ferramenta. Ao contrário, o uso dos modelos é essencial para o ordenamento do estudo das principais causas subjacentes aos fenômenos reais.

A função dos modelos é auxiliar o cientista na organização e construção de estruturas analíticas mais simples que servem, ao mesmo tempo, tanto como instrumento para a análise da dinâmica básica de um sistema, como também suporte para a compreensão mais holística de uma determinada realidade.

De maneira geral, os critérios para a classificação dos modelos ecossistêmicos variam entre: i) a forma como estes são apresentados, ii) o modo como lidam com as dimensões temporais e espaciais, iii) sua estrutura interna, e iv) seus propósitos.

Em se tratando da forma, as principais maneiras de se apresentar um modelo ecossistêmico são a forma diagramática (modelos conceituais), cuja configuração básica é apresentação simplificada das principais interações e variáveis presentes em determinado ecossistema, e a forma matemática (formalizada), que é a representação do comportamento dos objetos presentes no modelo através de equações.

Quanto ao tratamento do tempo e espaço, os modelos ecossistêmicos podem ser dinâmicos ou estáticos, contínuos ou discretos, estocásticos ou determinísticos, espaciais ou locais. A estrutura interna pode definí-los como modelos empíricos (black-box models) e de simulação (process-based models). Um modelo ecossistêmico pode ser de entendimento, educativo, preditivo ou base de conhecimento em função dos propósitos e finalidades usados para sua construção (VOINOV, 2008).

Ao construir um modelo ecossistêmico, o cientista deve, antes de qualquer coisa, ter em mente duas questões cruciais (GOMES; VARRIALE, 2004). Em primeiro lugar, deve-se procurar um meio pelo qual seja possível descrever as propriedades de um dado ecossistema usando-se apenas um subconjunto (mínimo) de suas relações. Em segundo lugar, deve-se verificar se determinado modelo escolhido (subconjunto das relações de um ecossistema) adequadamente descreve comportamentos experimentais observados.

A primeira questão, que diz respeito à fase de conceituação de um modelo, devem-se fazer distinções sobre os tipos de variáveis a serem consideradas que podem

referir-se a perturbações externas que são conhecidas, ou eventos externos sem controle ou possibilidade de mensuração. Existem também as variáveis de estado, que se associam às propriedades fundamentais dos ecossistemas e podem assumir valores diferentes em função da posição do espaço e instante do tempo considerados. Além dessas, há que se determinar as variáveis de saída e as variáveis responsáveis pela mensuração dos erros de medida, cuja natureza é essencialmente estocástica. Durante a fase de conceituação também se deve fazer a escolha dos parâmetros adequados. No sentido estrito e matemático do termo, parâmetros são quantidades que são mantidas fixas numa versão do modelo. Em um sentido mais amplo, parâmetro se refere a qualquer variável que afeta o ecossistema em análise (GOMES; VARRIALE, 2004).

Voinov (2008) os classifica como parâmetros de fronteira, que definem as fronteiras espaciais e temporais de um ecossistema, parâmetros constantes, que se referem aos coeficientes (estimados ou concebidos), e parâmetros externos que descrevem a influência do mundo externo sobre o ecossistema.

A fase de verificação, por sua vez, consiste na calibração e validação de um modelo. Por calibração entende-se o processo de obtenção das estimativas dos parâmetros de um modelo e a verificação das respostas obtidas com os dados experimentais. Em última instância, são os dados do modelo que são usados para calibrar o modelo matemático subjacente, refletindo a procura pelo melhor ajuste que pode ser feito entre as respostas estimadas e observadas, variando-se os valores de parâmetros selecionados (GOMES; VARRIALE, 2004).

Quanto à validação, esta se refere aos testes que são feitos para verificar de que maneira podem-se comparar os resultados estimados e os observados. O importante a ser frisado é que a validação não deve ser restrita apenas às informações utilizadas para a calibração do modelo. Em outras palavras, deve-se verificar se a performance do modelo é satisfatória e se o modelo não representa apenas uma estrutura empírica baseada em parâmetros calibrados (VOINOV, 2008). A validação não deve ser confundida com a verificação *stricto sensu*, sendo esta destinada aos testes de consistência interna e estabilidade de um modelo.

Segundo Costanza e Ruth (1998), os propósitos da modelagem dos sistemas ecológicos podem variar entre o desenvolvimento de simples modelos conceituais, os quais fornecem um entendimento geral do comportamento do sistema modelado, a aplicações realistas, cujo objetivo é avaliar diferentes propostas de política. Os três critérios necessários para avaliar a eficiência dos modelos são suas características de realismo, precisão e generalidade. Nenhum modelo poderá maximizar simultaneamente as três características, e a escolha de qual atributo será realçado dependerá dos propósitos fundamentais para o qual o modelo está sendo construído.

Em se tratando da valoração ecológica dos serviços ecossistêmicos, é clara a necessidade de modelos ecossistêmicos úteis para descrever a dinâmica dos fluxos de serviços ecossistêmicos. A própria evolução dos fluxos dos serviços ecossistêmicos pode indicar a existência de processos de degradação. Adicionalmente, a consideração das interações ecológicas pode revelar que a degradação de determinada função ecossistêmica leva à deterioração de vários serviços ecossistêmicos que dela dependem.

A ferramenta da modelagem ecológica permite a elaboração de cenários, considerada essencial para a formulação de políticas e para a apreciação de resultados ecológicos em função de vários tipos de estratégias adotadas. Uma vez apresentados os resultados dos cenários simulados, “experts” e sociedade civil podem conjuntamente decidir sobre aquela que melhor se adéqua a critérios ecológicos, econômicos e sociais.

O uso principal dos modelos é transmitir um ponto de vista do mundo, seu objetivo não é retratar a realidade, má sim aproximar-se a ela. No entanto, por essa característica, é que muitos desses modelos são úteis para entender as particularidades ou para prever o comportamento de um sistema. Em qualquer caso, os usuários dos modelos deverão ser conscientes dessas limitações.

Na pesquisa de caráter científico, os modelos empregam-se principalmente para entender tanto o mundo real como a estrutura lógica de um sistema abstrato, como é a teoria científica; mas também são utilizados para prever o estado futuro e até que ponto poderia chegar um dado processo dinâmico. Outra aplicação está ligada ao “controle”, intervenção ou manipulação guiada do comportamento de um sistema a fim de produzir uma condição desejada. O qual depende da informação disponível, com a

qual se conte, sobre os impulsos do sistema, suas respostas e funcionamento. Além do uso de modelos para interpretar a complexidade de uma situação, algumas vezes podem-se extrapolar os resultados em escalas espaciais ou temporais maiores ou em níveis de organização mais altos (VOINOV, 2008).

Apesar de suas vantagens, a disseminação dos modelos ecológicos requer a superação de alguns desafios. Em primeiro lugar, estão àqueles inerentes à própria resistência de pesquisadores em adotarem posturas transdisciplinares. Em segundo lugar, além do diálogo interdisciplinar, a elaboração de modelos ecológicos exige que os profissionais das Ciências Naturais e Exatas cheguem a um consenso sobre as várias abordagens adotadas, sobre os procedimentos básicos de especificação dos modelos e escolha das escalas espaciais e temporais adequadas.

2.1.3.7 Processos ecossistêmicos relacionados à prestação de serviços ecossistêmicos hídricos – SEH: O ciclo hidrológico

O modelo de simulação elaborado para a valoração ecológica de SEH é um modelo baseado nos processos ecossistêmicos que compreende o ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico está diretamente relacionado à movimentação que a água realiza entre os três grandes reservatórios existentes: a atmosfera, os oceanos e corpos de água e suas interações com os continentes. Este ciclo é responsável pela renovação da água no planeta. Sua manutenção se dá pela energia proveniente do sol, uma vez que tal energia aumenta as demandas por evaporação da água líquida ou por derretimento da mesma quando em seu estado sólido (FIGURA 9).

Figura 9 – Esquema do ciclo hidrológico
Fonte: Heat (2009)

O ciclo hidrológico não tem começo nem fim. A água é evaporada dos oceanos e da superfície continental e torna-se parte da atmosfera. A umidade atmosférica precipita-se tanto nos oceanos como nos continentes. Nos continentes a água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, escoar pela superfície dos terrenos, e/ou pode infiltrar-se no solo, de onde pode ser absorvida pelas plantas. Assim, o ciclo da água envolve vários e complexos processos hidrológicos: evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, etc.

Segundo Paula Lima (2008), o total de água existente no planeta, presa ao ciclo hidrológico, é estimado em $1,4 \times 1.018 \text{ m}^3$. Deste total, 97% encontram-se nos oceanos; 98 % constituem água na forma líquida, dos quais cerca de 2,6% é água doce. A água doce corresponde, portanto, a um volume de $3,6 \times 1.016 \text{ m}^3$. Deste volume, 77,2% encontram-se na forma sólida, nas calotas polares; 22,4% constitui a água subterrânea, e cerca de 0,4% compreende a água dos rios, lagos e o vapor atmosférico. A água no ciclo hidrológico movimenta-se continuamente: nuvens, chuva, cursos d'água, ondas e correntes oceânicas, etc. Em escala global, esta movimentação representa as trocas que ocorrem entre a terra, o oceano e a atmosfera.

Para Paula Lima (2008), o ciclo hidrológico, constitui-se de um conjunto de fases, as quais representam os diferentes caminhos através dos quais a água circula na natureza. Esta circulação ocorre na atmosfera, a hidrosfera e a litosfera. Numa profundidade aproximada de um km na litosfera, até cerca de 15 km na atmosfera. A água da atmosfera constitui a água precipitável. Se o total de vapor atmosférico se precipitasse, a chuva correspondente seria de cerca de 25,5 mm uniformemente distribuída sobre toda a superfície da esfera terrestre. Este reservatório (vapor atmosférico) é repostado continuamente pela evaporação e é descarregado pela precipitação, sendo esta a única fonte renovável de água doce para a superfície. A precipitação média no planeta é de aproximadamente 940 mm ano^{-1} . Cerca de 70% da precipitação retorna à atmosfera pela evaporação. Numa dada área, a quantidade de água envolvida em cada fase do ciclo hidrológico pode ser avaliada através do balanço hídrico baseado na equação de conservação de massa:

$$E - S = \Delta A \quad (1)$$

Em que:

E – São os fluxos positivos ou entradas de água (precipitação, importações superficiais de outra bacia, retornos da demanda);

S – São os fluxos negativos ou saída de água (interceptação, evaporação e evapotranspiração, evaporação dos corpos de água, evaporação em áreas urbanas, escoamento superficial, demanda interna da bacia, demanda externa da bacia); e

ΔA – É a variação no armazenamento (recarga de aquíferos, variação no nível dos corpos de água, infiltração).

i) Nascentes e recarga de água

As nascentes são pontos de surgência de água formadoras de pequenos e grandes rios que vão desaguar nos oceanos. Também são conhecidas popularmente como minas, olho e fontes de água, sendo caracterizadas como os pontos nos quais a água subterrânea aflora naturalmente através da superfície do solo, mesmo que de

forma intermitente, sendo responsáveis pela “produção de água” nas bacias hidrográficas.

Segundo Alvarenga (2004), a maioria das nascentes está localizada nas regiões montanhosas, nas chamadas bacias de cabeceira.

A água que jorra de uma nascente formará um pequeno curso de água que irá contribuir para o volume de água de outro curso e, assim, sucessivamente, formando grandes cursos de água, fundamentais tanto para o abastecimento urbano e agrícola, como para geração de energia, dentre outras funções. Portanto o desaparecimento de uma nascente resultará na redução do número de cursos de água, significando a redução da disponibilidade de água para os diversos usos (CASTRO, 2001). Este mesmo pesquisador relata que as nascentes podem ser classificadas quanto à periodicidade na produção de água, em perenes, para aquelas que apresentam um fluxo de água contínuo, até mesmo na estação seca; intermitentes para aquelas que apresentam produção de água principalmente na estação das chuvas, e efêmeras para aquelas que apresentam fluxo apenas durante ou logo após uma determinada chuva.

A perenidade de uma nascente é resultante da manutenção do nível do aquífero e de sua recarga subterrânea, e, quando suas áreas de acumulação sofrem intervenções de impacto, a qualidade e a quantidade de água podem ficar comprometidas (PINTO, 2003).

Segundo Davide (2002), as nascentes podem ser classificadas quanto ao tipo de reservatório a que estão associadas, em pontuais ou difusas. As nascentes pontuais são aquelas que apresentam a ocorrência do afloramento de água em um único ponto do terreno, sendo caracterizado pelo encontro da superfície do solo com sua camada impermeável, localizadas geralmente em grotas e em regiões montanhosas. As nascentes difusas são caracterizadas por não apresentarem um ponto bem definido da ocorrência de seu afloramento, geralmente encontradas em áreas alagadas, várzeas, voçorocas e matas localizadas na parte baixa do terreno.

Outra classificação de nascentes, diz respeito às características do aquífero. Neste caso existem nascentes muito suscetíveis ao ciclo hidrológico, com grande variabilidade temporal das vazões ao longo do ano, onde os aquíferos são considerados superficiais e sob influência da pressão atmosférica. Nestas nascentes,

verifica-se a existência de água sob temperatura ambiente e com baixa concentração de sais e outros elementos químicos, sendo, no entanto passíveis de contaminação biológica. Existem também nascentes cujo aquífero é dito confinado, sob pressão maior que a atmosférica. Nesta situação, não há variação significativa da vazão ao longo do ano, as águas são normalmente mais quentes e apresentam elevado teor de sais.

ii) A Bacia Hidrográfica como unidade de análise e os serviços ecossistêmicos hídricos

A unidade geográfica de análise, para a elaboração e aplicação do modelo desenvolvido no presente estudo é a bacia hidrográfica. Considera-se, portanto essencial sua definição assim como evidenciar a importância que tem para o estudo dos SEH.

A bacia hidrográfica é a unidade territorial de planejamento estratégico que transpõe as barreiras políticas, pois uma mesma bacia pode conter diversos municípios. Bacia Hidrográfica ou bacia de contribuição de um curso d'água é a área geográfica coletora de água de chuva que, escoando pela superfície do solo, atinge a seção considerada de um rio (PINTO et al., 1978).

Para Nunes (2001), a bacia hidrográfica de um rio é formada pelo território do qual pode afluir água para esse rio. Nesse contexto vemos que a sub-bacia hidrográfica é a área que drena as águas de chuvas por canais e tributários, para um curso principal, com vazão efluente convergindo para uma única saída desaguardando diretamente em outro rio (ROCHA, 1991).

A FIGURA 10 representa uma modelagem de uma bacia hidrográfica, aonde se vêem os divisores topográficos e a rede de drenagem.

Figura 10 – Esquema de uma bacia hidrográfica
Fonte: Paula Lima (2008)

As bacias hidrográficas constituem ecossistemas adequados para avaliação dos SEH que permitem o equilíbrio e manutenção da quantidade e qualidade da água (RANZINI, 1990). Elas se constituem em unidades de território naturais para a análise de ecossistemas, apresentando características próprias, as quais permitem utilizá-las para testar os efeitos do uso do solo nos ecossistemas (CASTRO, 1980).

O cuidado com a bacia hidrográfica é essencial para a vida de uma comunidade, pois segundo Cristofeletti (1981) para que um rio exista e funcione deve sempre haver uma área que lhe garanta o abastecimento, constituindo-se a sua bacia de drenagem. A mesma condição é válida para o surgimento de nascentes e cabeceiras fluviais.

Para Pozzebon (2000), o ciclo hidrológico, ao ser estudado em sua fase terrestre, tem como elemento fundamental as bacias hidrográficas. A recarga do lençol freático é de suma importância para a vazão da nascente, pois ele é que garante a continuidade de sua vazão.

Na bacia hidrográfica o balanço hídrico, descrito na Eq.(1), da-se em menor escala completando-se na mesma bacia. Segundo Paula Lima (2008), qualquer ponto da superfície forma parte de uma bacia hidrográfica. Até os menores vales têm uma área

de terreno que capta a água da chuva, perde água por evaporação, e produz o restante como escoamento superficial.

De forma esquemática, os processos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica podem ser examinados na FIGURA 11.

Figura 11 – Representação esquemática dos processos hidrológicos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica

Fonte: Paula Lima (2008)

A modelagem dos vários processos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, de acordo com Paula Lima (2008), pode ser visualizada através do esquema da seção transversal de um canal principal de uma bacia hidrográfica, como mostrado na FIGURA 12.

Figura 12 – Seção transversal de uma bacia hidrográfica com as variáveis hidrológicas envolvidas no seu balanço hídrico

Fonte: Paula Lima (2008)

Em que:

P= precipitação total

T= transpiração

Ic= interceptação pelas copas

Ip= interceptação pelo piso

Eo= evaporação do solo e de superfícies líquidas

Et= evapotranspiração (total de perdas por evaporação)

Q= deflúvio

Δs = variação do armazenamento da água do solo

L= vazamento freático

Pp= percolação profunda (vazamento por falhas na rocha)

Rs= escoamento superficial (em canais ou para superfície)

Rss= escoamento subsuperficial

Rb= escoamento básico (água subterrânea)

f= infiltração

Pc= precipitação direta nos canais

U= vazamento (água que flui por fora do leito)

De forma simplificada, para um dado período de tempo a equação do balanço hídrico será:

$$P = (T + I_c + I_p + E_o) + Q + \Delta A \pm L + U \quad (2)$$

Considerando uma bacia hidrográfica ideal, isto é, onde todos os fluxos positivos e negativos possam estar sob controle experimental, e onde não ocorram vazamentos (L ou U), e nem perdas por percolação profunda (PP), para um dado período a equação completa acima pode ser simplificada de acordo com o seguinte modelo (PAULA LIMA, 2008):

$$P - ET - Q \pm \Delta A = 0 \quad (3)$$

Essas condições ideais são essenciais para que se possa utilizar uma bacia qualquer como área experimental para estudos hidrológicos e florestais. A bacia hidrográfica é utilizada como unidade geográfica de planejamento ambiental. Sua gestão tem implicações diretas sobre a oferta e qualidade de água em uma determinada região. A Lei 9.433 de 1997, que implantou no Brasil a Política Nacional de Recursos Hídricos, define a bacia hidrográfica sendo o espaço geográfico para a gestão das águas.

Nesse contexto, outro conceito importante é o de sub-bacias ou microbacias hidrográficas definidas como sendo as unidades físicas de estudo da ciência ambiental que devem ser consideradas e analisadas de acordo com o objetivo dos estudos.

Para Cunha e Guerra (1996) uma sub-bacia hidrográfica é definida como o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, cuja delimitação é dada pelas linhas divisoras de água que demarcam seu contorno. Estas linhas que delimitam a sub-bacia são definidas pela conformação das curvas de nível existentes na carta topográfica e ligam os pontos mais elevados da região em torno da drenagem considerada.

Segundo Moster (2007) o termo sub-bacia tem sido definido como o sistema de cabeceira de drenagem de 1ª a 3ª ou 4ª ordem, diferindo de bacia hidrográfica de

ordem superior ou pela complexidade dos processos que nela ocorrem e das interações desses processos. Esses sistemas de cabeceira também são importantes para entender e proteger os sistemas a jusante, pois estão intimamente ligados. Enquanto os sistemas de cabeceira são pequenos e numerosos, o seu papel no meio ambiente é constantemente subestimado e em consequência eles são inadequadamente manejados, comparados às bacias de maior escala.

A sub-bacia constitui a manifestação bem definida de um sistema natural aberto e pode ser vista como a unidade ecossistêmica da paisagem, em termos da integração dos ciclos naturais de energia, de nutrientes e, principalmente, da água. Desta forma, ela apresenta uma condição singular e conveniente de definição espacial do ecossistema, dentro do qual é possível o estudo detalhado das interações entre o uso da terra e a quantidade e qualidade da água produzida pela sub-bacia (PAULA LIMA, 2008).

Os elementos que constituem uma sub-bacia hidrográfica influenciam diretamente as respostas aos eventos de precipitação. Destacam neste sentido, as suas unidades pedológicas, cobertura vegetal, características geomorfológicas (declividade, formato, área e rede de drenagem) e também as características geológicas. Para definir o comportamento do ciclo hidrológico, único e característico de uma determinada sub-bacia (GOLDENFUM, 2001; RIGHETTO, 1998).

Além de serem considerados espaços físico-territoriais estratégicos para a gestão ambiental, com ênfase nos recursos hídricos, as bacias hidrográficas são importantes como unidades de análise dos impactos da ação antrópica sobre as paisagens naturais, seus efeitos sobre a dinâmica dos fluxos de serviços ecossistêmicos e seus impactos finais sobre o bem-estar humano. As bacias hidrográficas podem ser consideradas ativos naturais que geram bens e serviços ecossistêmicos para a sociedade (POSTEL; THOMPSON Jr., 2005).

A TABELA 2 mostra a relação de alguns serviços ecossistêmicos que são prestados por bacias hidrográficas. As bacias são áreas geográficas que englobam vários tipos de coberturas naturais e antropizadas tais como: florestas, variados tipos de cobertura vegetal, terras agrícolas, áreas cobertas por água como rios e lagos, áreas

urbanas, etc., havendo, portanto, a presença de diversos serviços ecossistêmicos, pertencentes às categorias listadas no início deste trabalho.

Por serem essenciais para o bem-estar humano, a gestão sustentável das bacias hidrográficas e a melhoria da qualidade de vida de suas populações devem necessariamente considerar sua capacidade de provisão de serviços ecossistêmicos. Entre os serviços prestados, especial importância deve ser dada aos chamados serviços hidrológicos, os quais compreendem os serviços de purificação e filtragem da água, a regulação dos fluxos estacionais, o controle da erosão e dos sedimentos e a preservação de habitats naturais (POSTEL; THOMPSON Jr., 2005).

Tabela 2 – Serviços ecossistêmicos fornecidos por bacias hidrográficas

TIPO DE SERVIÇO
Oferta de água para uso agrícola, industrial e urbano-doméstico
Filtragem e purificação de água
Regulação dos fluxos
Regulação de enchentes
Controle da erosão e sedimentos
Produtos oriundos da pesca
Madeira e outros produtos florestais
Recreação e turismo
Habitat para preservação da biodiversidade
Prazer estético
Estabilização climática
Valores culturais, religiosos e de inspiração

Fonte: Postel e Thompson Jr. (2005)

A proteção de bacias e a manutenção de parte de suas áreas sob florestas têm sido incorporada como estratégia para gestão dos recursos hídricos. Programas de desenvolvimento de bacias hidrográficas podem ter impacto considerável sobre a provisão dos serviços hidrológicos. Kakade et al. (2002), ao analisar os benefícios alcançados por projetos que visavam ao desenvolvimento e gestão sustentável de cinco

bacias indianas, apontam que pode haver incrementos substanciais nos serviços de provisão de água para uso agrícola e melhoria na qualidade da água para uso doméstico.

Num outro estudo liderado pelo World Institute Resources (REVENGA et al., 1998) analisou a situação de 106 bacias hidrográficas primárias e concluiu que em aproximadamente um terço delas mais da metade de suas áreas terrestres foram convertidas para usos agrícolas e urbano-industriais.

Apesar da importância de se considerar as bacias hidrográficas como unidades básicas de análise e elaboração de políticas ambientais, ainda não é freqüente o estudo das trajetórias dos fluxos de serviços ecossistêmicos utilizando esta escala como referência. Menos comum ainda é a análise da provisão de serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas em função das mudanças no tipo de cobertura de suas terras.

A conversão de áreas de florestas para áreas cobertas com uso agrícola (tendência que se acentua nas regiões tropicais úmidas) tem um efeito negativo sobre a capacidade de provisão de serviços. A dinâmica do uso das terras é o principal vetor de mudanças nos fluxos de serviços ecossistêmicos providos pelas bacias hidrográficas. Esforços no sentido de se protegê-las não devem prescindir de se conhecer a dinâmica de mudança da cobertura da terra e seus impactos sobre as funções ecológicas e capacidade de geração de serviços (DE FRIES; BOUNOUA, 2004).

A falta de informação científica sobre a relação da dinâmica do uso das terras e serviços ecossistêmicos é um obstáculo para o desenvolvimento de mecanismos institucionais adequados para a proteção das bacias hidrográficas. Isto porque a compreensão da dinâmica ecológica de uma determinada bacia requer um nível de conhecimento que freqüentemente transcende a ótica de uma única disciplina. Sendo necessário o esforço conjunto de pesquisadores de várias áreas, para mapear as funções ecológicas presentes, sua trajetória em função da dinâmica do uso do solo e as alterações nos fluxos de serviços ecossistêmicos.

2.1.3.8 Ecossistemas florestais e serviços ecossistêmicos hídricos

Segundo Johnson e Perrot-Maitre (2000), os ecossistemas florestais proporcionam às sociedades humanas quatro tipos de benefícios relacionados à água:

a) Qualidade da água: as florestas podem fornecer às pessoas e indústria, fontes de água de qualidade (com baixos níveis de nutrientes e de poluentes químicos). Existe um número diverso de beneficiários potenciais deste tipo de serviços, desde os usuários rurais e urbanos até indústrias como destilarias, empresas de água mineral e refrigerantes, etc.

b) Regulação da vazão: a cobertura vegetal pode regular o escoamento superficial e subterrâneo de formas diferentes, visando o benefício das comunidades humanas ao evitar ou mitigar, por exemplo, as enchentes e os deslaves.

c) Provisão de água: as florestas de forma geral reduzem a vazão anual, no entanto em algumas situações elas podem aumentar a vazão na época seca. Os beneficiários deste tipo de SE seriam principalmente os agricultores irrigantes, as empresas de abastecimento de água, hidroelétricas e usuários de grande porte que de forma genérica dependem de fluxos regulares de água na época seca.

d) Produtividade aquática: as condições relacionadas à pesca, tanto no referente à qualidade como à quantidade, geralmente associam-se as características próprias “a montante” da bacia ou das bacias. Os beneficiários deste serviço incluem os praticantes da pesca esportiva e comercial, as agências oficiais de pesca e indústria turística.

i) Aspectos gerais da relação entre florestas e água

No presente estudo enfatiza-se a relação que guarda a conservação e ampliação de áreas florestadas com a geração de serviços ecossistêmicos hídricos. O modelo de simulação desenvolvido é uma ferramenta criada para estimar fluxos de SEH relacionados ao uso do solo, no caso particular, ao efeito que tem as florestas na captação e conservação da água em termos quantitativos dentro de uma unidade geográfica que neste caso é uma sub-bacia. Motivo pelo qual descrevem-se a seguir considerações científicas relevantes sobre o assunto, baseadas principalmente no trabalho de Bruijnzeel (2004).

Concernente à relação entre cobertura vegetal e a quantidade e qualidade de água numa determinada bacia ou micro bacia, as especificidades locais e os efeitos causados por altitudes distintas, relevos, solos e outros fatores são determinantes nos resultados finais de mudanças na cobertura vegetal e no uso do solo.

Desde o início do século passado, vários autores argumentam sobre o papel das florestas na alteração das condições hidrológicas podem ser encontrados. Os debates centram-se em duas teorias principais. A primeira delas, a “teoria da esponja”, defende o efeito do mesmo nome que seria realizado em conjunto pelas raízes das árvores, pela serapilheira e pelo solo, o qual resulta na absorção de água pelas raízes no período chuvoso e liberação da mesma no período seco (STEUP, 1927; OOSTERLING, 1927; citados em BRUIJNZEEL, 2004). A estes autores, se opunham aqueles (ROESSEL, 1939; 1928; 1927; ZWART, 1927, citados em BRUIJNZEEL, 2004) que argumentavam em favor da teoria da infiltração, a qual defende que o fluxo hidrológico mínimo é determinado pelo substrato geológico e não tem relação com a presença ou ausência de cobertura florestal. Tomando um caminho intermediário outros autores enfatizam a influência positiva das florestas no que diz respeito à prevenção da erosão dos solos e das enchentes, e não à garantia de um fluxo hidrológico mínimo no período seco (HERINGA, 1939; COSTER, 1938; DE HAAN, 1933 citados em BRUIJNZEEL, 2004).

Nos anos 80, Hamilton e King citados em Bruijnzeel (2004) realizaram um trabalho considerado como uma nova e mais “científica” visão das funções da floresta tropical em relação à água. Uma de suas principais conclusões diz respeito às funções das raízes das árvores, as quais funcionariam mais como bombas do que como esponjas (mais do que soltando água no período seco, elas removeriam água do solo neste período) permitindo que as plantas continuem a transpirar e crescer. Também em relação às enchentes, eles associaram as mesmas mais à capacidade de retenção de água do solo, do que à cobertura florestal.

Hamilton e Cassels (2003), afirmam que todas as plantas interceptam água, ao mesmo tempo em que realizam evapotranspiração. As árvores e florestas são grandes usuárias de água, por conta do sistema radicular profundo. E chamam a atenção para o fato de que a enorme gama de produtos derivados das florestas, dependem de um uso significativo de parte da água do planeta. Estes autores enfatizam que as florestas, mais do que qualquer outro tipo de cobertura do solo, mantém a qualidade das águas que recebem e que flui através delas.

ii) Relação entre a precipitação e as florestas tropicais

As florestas apresentam elevada evapotranspiração (comparada com a das pastagens e culturas agrícolas), no entanto, geram maior umidade atmosférica e maior convergência de vapor d'água e por causa disso há a maior probabilidade de formação de nuvens e geração de chuvas nesses locais (PIELKE et al., 1998; ANDRÉ et al., 1989 citados em BRUIJNZEEL, 2004).

A maior frequência de chuvas em áreas florestadas foi atribuída a efeitos orográficos ou a diferenças à exposição de ventos. Contudo, está claro que esta discussão não é simples e que há uma grande dificuldade, em separar impactos causados pelo homem, tais como o desmatamento. A utilização de modelos climáticos tem ajudado a reduzir estas incertezas. Uma conclusão de alguns destes modelos aponta para a menor, senão nula, influência do uso do solo em regiões com uma grande contribuição oceânica, como o Sudeste da Ásia, as ilhas do Pacífico ou do Caribe (KOSTER et al., 2000; citados em BRUIJNZEEL, 2004).

Autores citados no estudo de Bruijnzeel (2004), trabalhando com séries temporais, não encontraram correlações estatísticas significativas entre cobertura florestal e volume total de chuvas ou distribuição, incluindo Costa et al. (2003), quando avaliou o efeito da conversão de cerrado para pastagens ocorrida em 19% (33.000 km²) da bacia do rio Tocantins.

Tangtham e Sutthipibul (1989) encontraram, para o Norte da Tailândia, no período de 1951-1984, uma correlação positiva entre área florestal e número de dias de chuva. A mesma conclusão também se chegou no trabalho efetuado por Webb et al. (2005), no estado de São Paulo, para o período 1962-1992; que também não encontrou uma relação entre cobertura florestal e volume total de precipitação, mas sim uma significativa correlação positiva entre cobertura florestal e número de dias de chuva.

No Amazonas tem-se desenvolvido diversos modelos climatológicos procurando entender o papel da floresta e da transformação da floresta em extensas áreas de pastagens, na regulação do clima regional, desde meados dos anos 70. Os resultados destes esforços variam muito em função da parametrização utilizada na calibração dos modelos. Há um crescente consenso de que, com o avançar do processo de desmatamento, as temperaturas tendem a subir, enquanto que a evapotranspiração e

as chuvas tendem a reduzir (McGUFFIE et al., 1995; HENDERSON-SELLERS et al., 1993, citados em BRUIJNZEEL, 2004). Um assunto que tem merecido a atenção dos pesquisadores diz respeito à evidência da alteração, tanto espacial, quanto temporal, em relação à formação de nuvens a partir da conversão de áreas de floresta entre 1.000 e 10.000 km². Conversões de florestas maiores do que estas têm sido consideradas como capazes de causar alterações nos padrões de circulação atmosférica, a ponto de efetivamente influenciar os padrões de precipitação. Portanto, a partir destas observações, o que pode acontecer é que os aumentos de fluxo d'água normalmente observados a partir do desmatamento na escala local podem ser moderados ou até mesmo revertidos por conta do efeito na redução de chuvas na escala regional (COSTA, 2004, citado em BRUIJNZEEL, 2004).

No caso das florestas localizadas nas altas altitudes (onde as mesmas encontram as nuvens e capturam o vapor d'água existente nas mesmas), há uma clara redução no volume de chuvas, quando da conversão destas florestas para outros usos agrícolas (BRUIJNZEEL, 2004), o que prejudica o fluxo de água para as regiões à jusante.

Para Hamilton e Cassels (2003), estas florestas são as que melhor representam a combinação entre conservação da biodiversidade e proteção das bacias. Estas florestas, em geral, riquíssimas do ponto de vista da biodiversidade, também adicionam água ao sistema (além daquela recebida pela precipitação convencional) capturando água de forma horizontal, quando da passagem das nuvens por elas. Como a absorção de água do solo é grandemente reduzida por árvores cujas folhas estão sempre úmidas, o ganho líquido em água é muito grande, desta forma gerando um maior volume de água à jusante.

iii) Relação entre a captação de água e as florestas tropicais

As florestas funcionam como uma “esponja” absorvendo água durante o período chuvoso e soltando a mesma no período da seca. Se uma floresta é derrubada este efeito se perde por conta da rápida oxidação da matéria orgânica e da compactação causada pela passagem de máquinas ou excesso de pastoreio, resultando conseqüentemente na redução da captação de água no período seco. Numerosos

trabalhos mostram tal resultado (VALDYA; BARTARYA, 1989; PEREIRA, 1989; HAMILTON; KING, 1983 citados em BRUIJNZEEL, 2004).

Por outro lado há trabalhos, como o de Bruijnzeel (2004), que sugerem a situação oposta, ou seja, riachos e nascentes apresentando uma quantidade menor de água no período seco após o reflorestamento em áreas degradadas. Para melhor discutir esta questão, o primeiro ponto a considerar seria a distinção entre os efeitos da substituição da floresta em relação à quantidade total de água e em relação à distribuição sazonal dos fluxos hidrológicos.

Bruijnzeel (2004) aponta que estudos realizados em micro bacias pareadas mostram o efeito do aumento do volume total do fluxo de água, ao longo dos três primeiros anos após o desmatamento, ganhos estes proporcionais ao tamanho da cobertura florestal removida. Este aumento no fluxo de água reflete a diferença na evapotranspiração (entre a floresta madura e os outros usos que geralmente lhe sucedem as pastagens ou culturas anuais); reflete também a capacidade de interceptar a água da chuva e está associado com a menor capacidade de extração de água nos níveis mais profundos do solo, na época seca. O aumento no fluxo de água pode ser menos pronunciado ou até mesmo anulado dependendo do nível de regeneração da vegetação secundária, quando existente.

O efeito do aumento do fluxo total de água a partir da conversão da floresta para outros usos pode ser esperado como permanente ou temporário dependendo de uma série de fatores. Autores como Jipp et al. (1998); Fritsh (1993); e Mumeka (1986), citados em Bruijnzeel (2004) encontraram incrementos permanentes no caso de pastagens. Outros autores também citados em Bruijnzeel (2004), para chá (BLACKIE, 1979), borracha (MONTÉNY et al., 1985) e cacau (IMBACH et al., 1989).

Os níveis de captação de água voltaram ao mesmo patamar original quando do plantio de *Pinus* (BLACKIE, 1979 citado em BRUIJNZEEL, 2004) e a um nível mais baixo de captação de água, quando da substituição por *Eucaliptus*, em solos profundos, quando a espécie tem condições de “minerar” os solos e quando a precipitação total é inferior à quantidade consumida pela planta (CALDER et al., 1997; VISWANATHAM et al., 1982; SIKKA et al., 2003 citados em BRUIJNZEEL, 2004).

Estes estudos confirmaram que, particularmente em climas sub-úmidos, plantios de eucaliptos devem ser realizados através de um zoneamento bem feito, evitando-se o plantio ao longo de cursos de água e depressões ou em qualquer lugar onde as raízes encontrem rápido acesso às reservas de água subterrâneas.

Um ponto que chama a atenção foi o observado por diferentes autores, em relação ao aumento do escoamento superficial ocorrido em grandes bacias a partir da mudança do uso do solo. São exemplos disso os resultados de Binn-Ithnin (1988), na Malásia e Cheng (1999), no rio Yangtze, na China que apontam para o aumento do escoamento superficial devido ao aumento do processo de urbanização nestas áreas.

O trabalho de Costa et al. (2003), no cerrado brasileiro, mostrou um aumento do fluxo anual de água de 24%, na Bacia do Tocantins, após o processo de conversão para pastagens de 19% de uma área total de 175.360 km². A principal causa deste resultado foi a perda da capacidade de infiltração de água no solo, a partir da conversão para a pastagem (BRUIJNZEEL, 2004).

No entanto, é importante fazer a distinção entre fluxo total de água e fluxo sazonal, particularmente nas regiões onde os níveis de precipitação variam significativamente com a estação, conforme é o caso do Centro-Sul brasileiro. Nestas regiões, particularmente, o fluxo hidrológico na estação seca é um item que geralmente tem mais importância do que o fluxo total anual, porque reflete a disponibilidade de água na estação crítica, além de ter reflexos diretos nas questões referentes à qualidade de água. O que tem sido observado, com frequência, é a redução dos volumes de água na estação seca (após um período observado mais longo) o que aparentemente contradiz o dito anteriormente do aumento do volume de água total após a conversão de florestas. As razões para isto são citadas pelos seguintes autores em Bruijnzeel (2004):

a) A contínua exposição do solo nu ao impacto das chuvas tropicais após a eliminação da floresta (LAL, 1996; 1987);

b) A compactação do solo pelo uso de máquinas agrícolas (KAMARUZAMAN, 1991; MALMER; GRIP, 1990);

c) O excesso de pastoreio (GILMOUR et al., 1987; COSTALES, 1979);

d) O gradual desaparecimento da atividade da fauna do solo (LAL, 1987; AINA, 1984); e

e) O aumento na área impermeabilizada por estradas e assentamentos urbanos (ZIEGLER; GIAMBELLUCA, 1997; VAN DER WEERT, 1994; RIJSDIJK; BRUIJNZEEL, 1991; 1990).

Todos estes fatores contribuem para reduzir a infiltração da chuva no solo em áreas sem cobertura florestal. Como resultado, o volume de escoamento de água na estação chuvosa aumenta e pode assumir proporções tais que reduzem ou impedem a recarga de água do próprio solo, da água subterrânea e das nascentes. O resultado final é a redução dos fluxos hidrológicos na estação seca, apesar da menor evapotranspiração causada pela ausência de florestas.

Segundo Van Der Weert (1994), alguns exercícios de modelagem apontam para reduções de até 50% do fluxo hidrológico na estação seca, quando o escoamento superficial, causado pela redução na infiltração, ultrapassa 40% do volume total das chuvas. Bruijnzeel (2004) aponta que a resposta aos problemas de infiltração varia de acordo com a capacidade original de armazenamento de água do solo, sendo mais intensos naqueles com maior capacidade original de armazenamento (solos mais profundos). A redução da capacidade de infiltração não acontece quando à conversão de florestas para outros usos do solo como as práticas agrícolas que mantenham as características originais do solo. Se realizadas com êxito, estas práticas, somadas à redução da evapotranspiração, poderiam até garantir um maior fluxo de água na estação seca.

Em relação à capacidade de retenção da água na época chuvosa, ou ainda, em eventos mais intensos de chuvas, também vai depender da capacidade de infiltração do solo.

Hamilton e Cassels (2003) lembram que as florestas influenciam algumas das características que alteram esta capacidade de infiltração e em geral são a melhor opção em termos de uso do solo, no sentido de redução de volumes de água associado a enchentes e redução de picos de vazão. Tal efeito pode ser mais significativo na escala de micro bacia do que na escala de bacia, onde uma série de efeitos pode reduzir ou anular o efeito de determinada cobertura vegetal. Esses autores chamam a atenção para a importância deste efeito protetor das florestas, especialmente para as comunidades localizadas nas partes altas das bacias.

Para Bonell (1993) citado em Bruijnzeel (2004), a capacidade de infiltração de solos florestados não perturbados é tal que consegue acomodar a maior parte dos eventos chuvosos das diversas intensidades. Ainda que num processo de conversão florestal, se realize um trabalho de conservação das características de infiltração do solo em questão, o volume total de água que o solo terá que absorver será maior, dada a redução da evapotranspiração, aumentando a probabilidade do incremento no escoamento superficial. Fenômeno potencializado se somado ao normal aumento de superfícies impermeabilizadas que geralmente acompanham qualquer processo de conversão florestal para outros usos (BINN-ITHNIN, 1988, citado em BRUIJNZEEL, 2004).

Sintetizando, existe um aumento na vazão de água no curto prazo, decorrente da conversão florestal. Mas no longo prazo, a infiltração da água da chuva é normalmente reduzida de forma tal que a insuficiente recarga de água subterrânea ao longo do período chuvoso resulta em fortes reduções na vazão da água na estação seca (BRUIJNZEEL, 2004).

iv) Relação entre as florestas tropicais e a produção de sedimentos

Na relação entre florestas e bacias hidrográficas tem-se também a produção de sedimentos que são carregados para os rios. Para efeitos de tratamento de água, isso é considerado como uma poluição difusa, sendo um dos principais fatores vinculados à qualidade das águas.

Segundo Douglas (1996); Fritsh (1992) e Gilmour (1977) citados em Bruijnzeel (2004), a erosão de superfície e a produção de sedimentos em uma dada micro bacia, normalmente apresenta incrementos substanciais na ausência de cobertura florestal (em média $0,3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em solos florestados e $53 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em solos com serapilheira removida, ou solos manejados com fogo).

A principal razão é porque a erosão atinge valores mínimos em solos adequadamente protegidos e o efeito inverso em solos desprotegidos, tendência que pode aumentar na medida em que os solos perdem sua matéria orgânica original e avançam no processo de compactação, reduzindo assim sua estabilidade e capacidade

de infiltração, e desta forma, um processo (redução da capacidade de infiltração) acaba por alimentar o outro (produção de sedimentos) e vice-versa.

De acordo com Hamilton e Cassels (2003), a floresta não perturbada, e todos os seus componentes: a serapilheira, e o solo orgânico enriquecido é o melhor uso do solo, sob a ótica de uma bacia hidrográfica, no que se refere à proteção contra a erosão pela ação das águas. Qualquer atividade que reduza ou retire a proteção gerada pelos fatores acima incrementa a erosão. Minimizando o processo erosivo, as florestas reduzem o problema da sedimentação. A sedimentação pode tornar a água inadequada para uso humano ou para irrigação, ou aumentar enormemente seu custo para torná-las utilizáveis. Os sedimentos também podem reduzir a capacidade dos rios serem navegáveis; reduzir a biodiversidade aquática, reduzindo a pesca; reduzir prematuramente a capacidade dos reservatórios e incrementar o atrito nas turbinas hidroelétricas.

v) Relação entre as florestas tropicais, matas ciliares e a qualidade da água

As florestas exercem efeitos positivos em relação a outros potenciais contaminantes da água, provenientes de outros tipos de usos de solo. Os quais podem acarretarem diversos tipos de poluentes levados aos cursos d'água, tais como os fertilizantes e agrotóxicos usados na agricultura, dejetos animais derivados da pecuária, ou ainda aqueles decorrentes do processo de urbanização. De acordo com Hamilton e Cassels (2003), em algumas regiões do mundo, como a Austrália, onde há um acúmulo de sais no subsolo, a retirada de florestas pode ser catastrófica. Por conta da elevação da água subterrânea e da redução da evapotranspiração, a conseqüente elevação dos sais para a zona de absorção das raízes das plantas agrícolas, torna a área imprópria para a agricultura.

Para os autores anteriormente citados, com relação à qualidade de água, as florestas são normalmente a melhor cobertura vegetal. Elas provêm a melhor proteção contra erosão, sedimentação e transporte de outros contaminantes. Esta percepção tem levado ao estabelecimento do conceito de “florestas protetoras de bacias”, em locais onde a demanda de água potável é necessária, tais como os exemplos de Melbourne, na Austrália, Nova York, nos Estados Unidos e Quito, no Equador.

Hamilton e Cassels (2003) chamam a atenção para a relação entre as matas ciliares e a qualidade de água. As matas ciliares são aquelas localizadas ao longo dos córregos e rios que auxiliam na filtração e imobilização de sedimentos e outros poluentes, ajudando a reduzir a contaminação dos corpos d'água. Também são capazes de diminuir a erosão das margens dos rios, assim como mantêm mais frias as temperaturas aquáticas. As matas ciliares têm grande valor, também para a provisão de habitats para a fauna terrestre e aviária, assim como para a biodiversidade aquática. No contexto da bacia hidrográfica é evidente o seu papel como ligação entre a zona terrestre e os rios e córregos que compõem uma bacia.

2.1.3.9 Programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos – PSH

Desde a reunião de Rio-92, o mundo vem tratando de desenvolver-se de forma sustentável. No entanto, ao refletir no caminho do desenvolvimento dos países do primeiro mundo vemos um atalho cheio de depredação e desrespeito com a natureza. Este mesmo caminho está sendo seguido pela maioria dos países hoje em dia. É claro que se têm exemplos de esforços louváveis por alcançar o desenvolvimento sustentável, mas que muitos concordam deve ser redobrado se se quer realmente passar às próximas gerações um mundo melhor. Parte da razão para tal depredação origina-se no fato de que não se havia internalizado nas decisões do dia a dia, os impactos ambientais, quer sejam estes negativos ou positivos (VEIGA NETO, 2008).

Poucas vezes, os pesquisadores da área de recursos naturais e ambientais incluem em seus estudos aspectos de ordem econômico-financeiro, necessários para os tomadores de decisão. O instrumento de pagamentos por serviços ecossistêmicos é um instrumento que permite a aproximação à linguagem econômico-financeira. É uma linguagem que não só entende o Ministro de Economia, mas também entende o proprietário rural. Os PSE fundamentalmente consistem num arranjo entre usuários da terra (fornecedores de serviços) e usuários de serviços. De modo que, por exemplo, pode-se dizer que alguém que quer milho tem que pagar ao produtor, quem quiser água limpa deveria pagar àqueles que a conservam. Este arranjo deve ser do interesse de todos. O fornecedor de serviços recebe um pagamento que faz com que conservação

seja mais atrativa que atividades que causam danos, e o usuário de serviços evita custos significativos.

Uma parte muito importante desta lógica é que na maioria dos casos se terá que continuar fazendo um pagamento indefinidamente. Um pagamento de curta duração quase nunca funcionará. Aqui outra vez a lógica é a mesma que com outros bens produzidos na terra. Se quisermos que fazendeiros produzam milho este ano temos que pagar-lhes. Se quisermos que eles produzam milho no próximo ano teremos que pagar pelo milho no próximo ano e assim sucessivamente.

Os PSE são mecanismos que servem para melhorar o fornecimento de serviços ecossistêmicos nos quais:

- i) Aqueles que estão fornecendo os serviços são pagos por fazer isso (“fornecedor recebe”);
- ii) Aqueles que se beneficiam dos serviços ambientais pagam por sua provisão (“usuário paga”);
- iii) Os pagamentos são condicionais e
- iv) A participação é voluntária.

A maior parte dos esquemas de pagamentos já existentes trabalha com quatro grandes grupos de serviços ecossistêmicos: a) Mercado de carbono; b) proteção da biodiversidade; c) proteção de bacias hidrográfica e d) proteção para beleza cênica (WUNDER, 2007).

Como mencionado na parte introdutória do presente trabalho, os SEH resultam das funções ecossistêmicas que oferecem à sociedade água em quantidade e qualidade apropriadas. Estes serviços estão estreitamente ligados ao ciclo hidrológico e às características dos ecossistemas. Segundo Celleri (2009), os principais SEH são: a) a regulação do ciclo hidrológico, b) o maior fluxo hídrico, c) a manutenção da qualidade da água e d) a recarga dos aquíferos.

O instrumento de pagamento por serviços ecossistêmicos hídricos de forma genérica é definido como um mecanismo de tipo compensatório baseado no princípio do “provedor-recebedor”, no qual os fornecedores de serviços ecossistêmicos hídricos são pagos pelos beneficiários desses serviços. Atualmente, os programas que utilizam os PSE são considerados pela FAO (2004) mecanismos promissores para o

financiamento da proteção e restauração ambiental, assim como forma de complementar e reforçar as regulações existentes.

2.1.3.9.1 Experiências internacionais de programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos – PSH

Nesta secção descrevem-se alguns casos que são considerados emblemáticos com respeito aos pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos:

i) Pacote de compensação aos “produtores de água” em Nova York

O Sistema de Águas da cidade de Nova York atende a nove milhões de pessoas, com o fornecimento de aproximadamente 4,5 milhões de $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ de água, entregues a 600.000 residências e 200.000 estabelecimentos comerciais na cidade, além de diversos sistemas locais nos subúrbios. Esta água é coletada em três bacias, Croton, Catskill e Delaware, localizadas ao norte da cidade, e que somam aproximadamente 830.000 hectares (APPLETON, 2002).

A cidade de Nova York, até o último quarto do século XX vinha sendo capaz de manter a excelente qualidade de sua água, sem a necessidade de sistemas de filtragem ou tratamento, graças à manutenção das características originais das bacias de abastecimento, que permaneciam com suas características rurais inalteradas. Mas a partir do início dos anos 80, a sombra dos problemas de qualidade de água começou a aparecer inicialmente na bacia de Croton, responsável por 10% do abastecimento, principalmente por conta do processo de urbanização da mesma e do aumento da poluição difusa, o que obrigou ao dimensionamento e implantação de um sistema de filtragem e tratamento nesta bacia. A falha na proteção do sistema de Croton chamou a atenção para a necessidade de proteção da área responsável pelos outros 90% de abastecimento, as bacias do Catskill/Delaware, as quais apenas 30% encontravam-se nas mãos do Poder Público e protegidas do processo de urbanização. O restante da bacia estava em mãos de produtores rurais, cujas atividades tradicionais vinham apresentando forte tendência de redução de lucratividade e transformação para novas atividades, particularmente para o mercado de “segundas residências”, tipo de

urbanização comum, no entorno de grandes cidades, desenvolvimento este potencialmente gerador de novas fontes de poluição (APPLETON, 2002).

A estratégia de gestão adotada para a proteção das bacias Catskill/Delaware é uma experiência de sucesso que mostra a efetividade dos instrumentos voluntários para conservação dos recursos naturais. O PSE nesse caso não só conciliou o bem estar dos produtores e usuários de água, mas também contribui para a melhor distribuição de renda já que os “produtores de água” estavam entre os residentes mais pobres do estado de Nova York, enquanto os usuários estavam entre os mais ricos.

Em 1989, a Agência para a Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos (EPA) emitiu uma norma para tratamento de água superficial. Essa norma exigiu a filtragem das águas de fontes superficiais em todos os sistemas municipais, a menos que se cumprissem rigorosos critérios de saúde pública e que tivesse em operação uma estratégia aprovação de gestão de bacias. A construção do sistema de filtragem das águas das bacias de Catskill/Delaware teve um custo estimado de US\$ 6 bilhões e um custo anual de manutenção de US\$ 200 milhões (ROSA et al., 2003).

Frente aos exorbitantes custos para tratamento da água, o EPA tentou impor novas regulações de uso do solo nessas bacias em 1990, que limitariam as oportunidades agrícolas e os meios de vida rural. As comunidades dessas bacias se opuseram firmemente contra essas regulações, pois a construção das represas e dos aquedutos já interferiu negativamente nessas comunidades. E ainda, a comunidade agrícola acusou os residentes da cidade de Nova York como os verdadeiros contaminantes das águas da bacia.

Depois de sete anos de intensas negociações, em 1997, foi estabelecida uma nova estratégia de gestão de bacias. O plano é conhecido oficialmente como Memorando de Entendimento, no qual compromete a cidade de Nova York a transferir recursos econômicos para os agricultores melhoraram a qualidade da água ofertada. Isso inclui aquisição de terras e novas regulações com ajuda financeira a essas comunidades de forma a promover a qualidade ambiental e suas economias locais (ROSA et al., 2003).

As iniciativas de apoio aos produtores em conjunto representou um pacote de compensação. O componente central do pacote foi o Programa Agrícola da Bacia. Era

um programa voluntário e localmente administrado que utilizam os fundos da cidade para implementar práticas ambientalmente apropriadas nas propriedades rurais da bacia. O produtor que voluntariamente aderiu ao Programa recebeu assistência técnica para elaboração de um Plano Integral da Propriedade que define uma estratégia integral para controlar as fontes potenciais de contaminação da propriedade compatível com os objetivos econômicos da propriedade. A cidade de Nova York cobriu a totalidade dos custos associados à implementação do Plano nas propriedades participantes. Dessa forma, os produtores receberam assistência técnica e administrativa, novos equipamentos e infra-estrutura para melhorar suas operações agrícolas, bem como reduzir o impacto ambiental negativo de suas propriedades (APPLETON, 2002).

Os produtores que participaram do Programa podiam acessar outros programas, dentre eles: um programa que paga a produtores para não mais usar as áreas ribeirinhas para produção agrícola; um programa que compensa os produtores que se comprometem a longo prazo com a agricultura sustentável e renunciam legalmente ao direito de mudar o uso do solo; um programa que ajuda a desenvolver mercado para os produtos da bacia entre outros.

Além dos benefícios, os produtores foram beneficiados com a segurança de se sentirem protegidos contra futuras regulações a utilização de terra e por serem reconhecidos como produtores ambientalmente corretos. O conceito envolvido foi que ao invés de impor restrições aos produtores, dever-se-ia prover os agricultores de assistência técnica e econômica pra melhorar suas práticas ambientais.

ii) Esquema oficial de PSE na Costa Rica

O PSE na Costa Rica é uma das experiências pioneiras e de maior êxito no mundo. A Costa Rica foi palco de uma das maiores taxas de desmatamento entre os anos 70 e 90, do século XX, no qual se estima que o país perdeu cerca de 30 a 40% de sua cobertura florestal, causado basicamente, pela conversão de florestas nativas para a agricultura e para a pecuária. Mas felizmente ficou claro para alguns tomadores de decisão no país que o desmatamento também trouxe perda de diversos SE dentre eles os ligados à água (PAGIOLA, 2002).

O PSE implementado na Costa Rica teve início em 1997 está baseado na Lei Florestal do país, nº 7.575, promulgada em 1996, o Programa explicitamente reconheceu quatro serviços ecossistêmicos promovidos pelos ecossistemas florestais, a saber: a) mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE); b) serviços hidrológicos, incluindo provisão de água para consumo humano, para irrigação e para produção de energia; c) conservação da biodiversidade; e d) provisão de beleza cênica para recreação e ecoturismo.

Sua origem está associada aos programas de subsídios ao plantio de árvores na década de 1960, e foi evoluindo de forma a enxergar o papel das florestas de forma integral. Hoje, ele opera também com iniciativas locais que são mais adaptadas as especificidades locais. O esquema oficial enfatiza os serviços ecossistêmicos globais, como a biodiversidade e o seqüestro de carbono. Enquanto que as iniciativas locais se orientam mais para a proteção dos recursos hídricos para o abastecimento humano e geração de energia (OROZCO; RUIZ, 2002).

O Programa está fundamentado no princípio que os proprietários de florestas e plantações florestais devem ser remunerados para compensar os benefícios que oferecem a sociedade. Uma experiência local interessante foi a implementada para proteger a água utilizada na geração de energia na bacia do rio Platanar. Essa necessidade levou a Empresa Hidroelétrica Matamoros a firmar um acordo voluntário com o organismo não governamental (ONG), FUNDECOR e o Ministério de Meio Ambiente e Energia, em 1999 no qual ela se comprometia a pagar US\$ 15 ha ano⁻¹ durante cinco anos ao Fundo Nacional de Financiamento Florestal (FONAFIFO). Esse recurso era revertido para os produtores da bacia que protegiam florestas e que estavam reflorestando. Um ano depois, a empresa aceitou pagar o dobro por hectare por um período de dez anos. Mediante o acordo voluntário, 26 produtores participaram do PSE e protegeram 796 hectares de floresta nessa bacia, o que representou 25% da superfície dela (ROSA et al., 2003).

ii.1) Fonte e gestão do recurso financeiro: O FONAFIFO

A lei 7575, art. 48, cria o FONAFIFO para captar o financiamento e administrar o esquema de PSE. As ONGs facilitam o processo assessorando os produtores para

realizar os trâmites administrativos e os técnicos e oferecem os serviços de extensão florestal. Também apóiam a elaboração de produtos e buscam fortalecer o mercado florestal por meio da certificação e redes de informação do mercado de madeira (CAMACHO, 2002).

A Lei florestal da Costa Rica em seu artigo 69 estabelece um imposto sobre o consumo de combustíveis fósseis como fonte de financiamento para “pagamento de serviços ecossistêmicos”.

Embora a maior parte dos recursos provenha dos impostos sobre o combustível, o FONAFIFO capta recursos por outras fontes tais como:

- Recursos provenientes de organismos internacionais, como o The Global Environment Facility (GEF) e o Banco Mundial;
- Recursos internos por meio de acordos voluntários com instituições públicas descentralizadas como a Companhia Nacional de Força e Luz da Costa Rica;
- Acordos com entes públicos e privados, como com as empresas hidroelétricas e Cervejaria Costa Rica; e
- Certificados ambientais emitido por FONAFIFO, cujo valor declarado é equivalente ao custo de proteger um hectare de florestas por um período determinado. O valor do documento, certificado por uma organização com reconhecimento internacional, é dedutível da renda bruta como um gasto e pode ser utilizado com custo ambiental.

iii) O caso dos PSE no Equador

Na América Latina, no Equador vem desenvolvendo uma experiência inovadora na construção de esquemas de PSE, baseados na relação entre floresta e água, através do mecanismo financeiro denominado de Fundo para Conservação de Água (FONAG). A idéia de criação de um fundo para a conservação da água que abastece a cidade de Quito apareceu inicialmente em 1997, através de uma campanha para a proteção das nascentes que abastecem a cidade, localizadas na Reserva Biológica do Condor, área protegida com mais de um milhão de hectares e de grande riqueza em biodiversidade, e posteriormente, em 1998, através do comprometimento de instituições locais, como a Prefeitura do município de Quito e a Fundação Antisana, e ONGs internacionais atuantes na região.

No início do processo de desenvolvimento do Fundo, o foco do trabalho foi a discussão das principais ferramentas que seriam apropriadas para o aporte de recursos e para a constituição do mesmo, na qual chegou-se à conclusão de que as cotas de uso de água seriam as mais indicadas. Os principais usuários identificados foram a Companhia Municipal de Água (EMAAP-Q), a Companhia e a Empresa Elétrica de Quito (EEQ), cuja produção de energia está baseada na hidroeletricidade.

O FONAG foi criado em janeiro de 2000, como um fideicomisso. O Fundo foi constituído a partir de recursos destinados pela EMAAP-Q (um por cento de suas receitas mensais de vendas de água, aproximadamente US\$ 360 mil ano⁻¹), pela EEQ (US\$ 45 mil ano⁻¹), por um produtor privado de cerveja (US\$ 6 mil ano⁻¹) e também pela Agência Suíça de Cooperação (US\$ 10 mil ano⁻¹ por dois anos). O fundo está estruturado como um “endowment fund”, ou seja, os recursos aportados vão se acumulando na forma de capital, e os rendimentos derivados da aplicação deste capital, são utilizados nas diversas atividades previamente definidas, entre elas: a) a legalização da titulação de terras e aquisição de áreas estrategicamente importantes; b) sistema de fiscalização de atividades ilegais, tais como incêndios, caça e pesca; c) medidas de proteção hidrológica, como cercas ao redor de mananciais e controle de erosão; e d) promoção de sistemas agrícolas sustentáveis; e) monitoramento e avaliação de projetos (KRCHNAK, 2007).

Os rendimentos do Fundo começaram a financiar projetos de proteção de bacias a partir de 2003, tais como recuperação de margens de rios, reflorestamento em áreas críticas, limpeza de lixos clandestinos, educação ambiental, apoio às melhores práticas agrícolas e pecuárias e pagamentos de salários de guarda-parques na Reserva Biológica do Condor.

iv) França

Segundo Veiga Neto (2008), na França a empresa Perrier-Vittel, uma das maiores empresas de água mineral do mundo entendeu que seria mais vantajoso em termos de custo-efetivo proteger suas nascentes de água do que construir estações de filtragem ou mudar para novas fontes de água. Por conta disto, a empresa no final dos anos 80

deu início em um agressivo programa de manejo das bacias hidrográficas que dependia seu fornecimento de matéria-prima.

O objetivo do programa foi reduzir os níveis de contaminação por nitrato e pesticidas, assim como o de restaurar os processos naturais de purificação de água na sub-bacia do Reno-Meuse, localizada no nordeste da França, região intensamente utilizada para agricultura e pecuária. O principal foco do programa foi dado às atividades rurais, e a premissa utilizada foi de que as melhores práticas de manejo restabeleceriam a qualidade da água aos níveis desejados. O pacote introduzido junto aos produtores incluía a pecuária leiteira baseada na utilização de pastagens, a melhoria do manejo de esterco e a eliminação do cultivo de milho, evitando assim o uso de agrotóxicos.

A empresa assinou contratos de duração de 18 a 30 anos com os produtores, nos quais eles assumiram o compromisso de mudar para tecnologias de produção menos intensivas. Os contratos cobriram aproximadamente 10.000 hectares de áreas rurais em 40 propriedades rurais. A base para os pagamentos não foi a relação entre os poluentes e a qualidade da água, mas sim os custos associados à perda de rentabilidade entre as atividades mais impactantes e as menos impactantes, em última instância, os custos de oportunidade da atividade padrão.

v) Colômbia

A Bacia Hidrográfica do rio Cauca é uma das maiores e mais importantes bacias na Colômbia e drena um dos mais férteis vales do país, responsável pelo abastecimento da segunda maior cidade da Colômbia, da cidade de Cali.

Em 1959, foi criada a Corporação do Vale de Cauca, responsável pela alocação de água entre os diferentes usuários do Vale.

Embora os recursos hídricos sejam abundantes na região, no final dos anos 80, um rápido processo de expansão urbana, industrial e agrícola resultou em uma crescente escassez de água na estação seca para os seus cinco milhões de habitantes e suas atividades econômicas, assim como um incremento de enchentes durante a estação chuvosa. Os produtores rurais foram especialmente afetados, por conta da prioridade dada ao abastecimento doméstico. A partir daí, e por conta dos limitados

recursos da Corporação, para lidar com o problema, produtores de arroz e cana de açúcar localizados nas partes baixas da bacia, organizaram-se em doze associações de usuários e voluntariamente concordaram em incrementar suas taxas pelo uso da água em troca de uma melhoria no gerenciamento dos recursos hídricos da bacia.

O principal objetivo dos produtores no programa proposto seria o incremento da vazão de água em benefício das atividades agrícolas. O programa, cobrindo aproximadamente um milhão de hectares, envolveu a restauração florestal, particularmente nas áreas íngremes, assim como o controle de erosão e a proteção de nascentes e cursos de água e a compra de áreas estratégicas.

O programa foi financiado através do pagamento voluntário de uma taxa no valor de US\$ 1,50 a US\$ 2,00 por litro por segundo por trimestre pelos produtores de arroz e cana participantes das associações criadas para este fim. Estes recursos, adicionais aos US\$ 0,50 por litro/segundo/trimestre que eles já pagavam anteriormente à Corporação, foram colocados em um fundo separado para ser utilizado para financiar as ações entendidas como necessárias para incrementar a vazão (VEIGA NETO, 2008).

Apesar de nenhum estudo hidrológico formal ter sido realizado, os participantes do programa perceberam uma maior estabilização da bacia e uma regularização da vazão, após a implementação do mesmo. O fato de um dos rios da bacia não ter experimentado enchentes nos últimos dez anos, também foi percebido pelos agricultores locais, como um sinal de que o programa alcançou bons resultados.

vi) Austrália

A Bacia de Mully-Darling cobre mais de um milhão de quilômetros quadrados na parte leste da Austrália. A salinidade do solo é uma característica natural de uma boa parte da bacia, mas o desmatamento, particularmente na sub-bacia do rio Macquarie, causou um aumento no problema de salinização.

A perda de cobertura vegetal significa menos água sendo absorvida e por conta disto, uma elevação no nível da água subterrânea e um carregamento de sais para a superfície do solo. O aumento de salinidade decorrente deste processo afeta o crescimento e a produção das culturas agrícolas.

Entendendo o problema que estava acarretando para suas culturas agrícolas, em 1999, uma associação de 600 produtores agrícolas, a Macquarie River Food and Fiber, entrou em um acordo com a empresa State Forests, empresa pública do estado de New South Wales, responsável pelo manejo de mais de dois milhões de hectares de florestas públicas, para apoiar o plantio de árvores como uma estratégia para a redução de salinidade nas áreas florestais pertencentes à empresa, a montante das áreas agrícolas. Este apoio foi realizado através da compra de créditos de salinidade emitidos pela State Forests, créditos estes baseados na quantidade de água transpirados pelo plantio de árvores, e que foram utilizados pela empresa pública para financiar o plantio.

Os preços dos créditos foram expressos em dólares australianos por milhões de litros de transpiração adicional por ano, assumindo que um hectare de floresta gera cinco milhões de litros transpirados por ano. Os produtores rurais concordaram em pagar dezessete dólares australianos por milhão de litros de água transpirada, ou de outra forma, oitenta e cinco dólares australianos por hectare por ano. Este valor foi calculado levando em consideração as outras opções de redução de salinidade e as premissas do papel da transpiração florestal. Neste caso, o papel do setor público foi fundamental, por ter sido uma empresa pública, a vendedora dos créditos de salinidade e aquela que desenvolveu o projeto piloto (VEIGA NETO, 2008).

2.1.3.9.2 Experiências de programas de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos – PSH no Brasil

No Brasil, têm-se exemplos de experiências já instauradas do uso de PSE, que utilizam o conceito de pagamento por SE para manter a qualidade e quantidade dos recursos hídricos, inseridos dentro do Programa Produtor de Água, criado pela ANA; dentre eles podemos citar, o Projeto Conservador das Águas Extrema, no estado de Minas Gerais e o Produtor de Água em Joanópolis e Nazaré Paulista no estado de São Paulo. Estes projetos têm por objetivo que os pagamentos sejam feitos aos fornecedores de serviços ecossistêmicos, através de práticas e manejos conservacionistas, que contribuam para a melhoria das condições dos recursos hídricos, segundo o conceito provedor-recebedor, onde o beneficiário dos serviços ecossistêmicos paga e o conservacionista recebe. Os fornecedores de SE podem ser

produtores individuais, associações de produtores ou até comitês de bacias (ANA, 2010).

i) Aspectos jurídicos dos PSH no Brasil

Tradicionalmente no Brasil são usados instrumentos coercitivos como mecanismo para garantir os serviços ambientais prestados pelas florestas e ambientes naturais preservados tais como as multas que são baseadas no princípio “poluidor-pagador” e têm amparo na legislação ambiental Brasileira (Código Florestal Lei nº 4.771/65, Lei de Crimes Ambientais, Lei nº 9.605/98). No entanto, alguns autores têm demonstrado que a proteção e conservação ambiental e o controle da poluição tem maior eficácia quando se usam políticas de incentivo, como aquelas baseadas no princípio do “provedor-recebedor” (CLAASSEN, 2001).

No caso da água é importante apontar que desde a promulgação da Lei nº 9.433 de 1997, que trata da gestão dos recursos hídricos no Brasil tem-se a base potencial para o estabelecimento de programas de PSH e outros mecanismos de compensação no Brasil. Esta Lei trouxe uma série de novas colocações que estabelecem a nova Política de Recursos Hídricos brasileira. Encontra-se baseada em fundamentos tais como:

a) a água é um bem de domínio público, b) a água é um recurso natural limitado, que tem valor econômico e por ser limitado, denota escassez e por ter valor econômico, permite sua cobrança; c) em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; d) a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; e) a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; f) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do setor público, dos usuários e da sociedade civil organizada, através dos Comitês de Bacia (D'ALTERIO et al., 2000).

Em relação aos Comitês de Bacia, compostos a) pelo setor público dos Governos federal, estaduais e municipais, b) pelo setor privado usuário da água, e c) pela

sociedade civil organizada, são os responsáveis pelo estabelecimento de políticas e programas que visem o uso sustentável da bacia hidrográfica.

Também criadas pela Lei 9433, as Agências de Bacia são as instituições responsáveis pela implementação das políticas e programas desenhados e definidos pelos Comitês em cada bacia hidrográfica. Estas instituições ligadas às bacias e Comitês e suas respectivas agências, podem ser consideradas não somente como uma importante fonte de recursos em potencial para a implantação de sistemas de PSH, por conta dos recursos anuais advindos da cobrança pelo uso da água, mas também, podem assumir um rol importante no gerenciamento destas estruturas no nível da bacia hidrográfica. Este sistema encontra-se estruturado para fazer a ligação entre beneficiários dos serviços (usuários) e os provedores destes serviços (produtores rurais e eventualmente Unidades de Conservação de caráter publico).

A cobrança pelo uso da água vem sendo gradativamente desenvolvida no âmbito do sistema nacional de gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, e teve início no nível federal, no ano de 2003, na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Em 2006 as Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ foram às segundas bacias federais onde a cobrança pelo uso da água foi implantada. A cobrança é um instrumento fundamental para a provisão de recursos de forma sustentável no longo prazo que possam ajudar no financiamento de programas e projetos de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos.

2.1.3.9.2.1 O Programa “Produtor de Água” nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (BH-PCJ)

O Programa “Produtor de água” foi proposto pela ANA (CHAVES et al., 2004a; 2004b), visando desenvolver uma metodologia de pagamentos por serviços ecossistêmicos (entendidos estes últimos, segundo os autores, como aqueles serviços fornecidos pelos sistemas naturais através de ações antrópicas ou não que geram certo impacto no ecossistema e que beneficiam de forma direta ou indireta as sociedades humanas), e projetos piloto de conservação de mananciais estratégicos. Na sua fase inicial o programa está sendo implementado nas BH – PCJ e compreende dois projetos piloto: a) o “Produtor de Água”, e b) o “Conservador das Águas”. Esse último será

analisado com maior detalhe já que o modelo desenvolvido neste estudo, tem sido parametrizado no local onde se implementa esse projeto.

i) Antecedentes

As Bacias PCJ ocupam uma área de 15.303,67 km² localizadas quase em sua totalidade no estado de São Paulo (64 municípios) na região de Campinas e Piracicaba, tendo apenas uma pequena parte de sua cabeceira localizada no estado de Minas Gerais (cinco municípios), a qual é responsável por boa parte do volume de água que abastece a mesma.

Na década de 60, em função da necessidade de maior quantidade de água para abastecer a região da Grande São Paulo, foram realizados muitos estudos e algumas alternativas foram apontadas. A opção adotada e implantada a partir do final dos anos 60, foi a captação de água para abastecer São Paulo a partir da região das cabeceiras (nascentes) da bacia do rio Piracicaba, surgindo então o “Sistema Cantareira”. O Sistema Cantareira é composto por quatro grandes reservatórios formados pelos rios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, dos quais os três primeiros localizam-se nas cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Piracicaba e o último na bacia do Alto Tietê.

Este sistema é o responsável pelo abastecimento de 50% da população da Grande São Paulo, ou seja, aproximadamente 10 milhões de habitantes, e pode ser considerado um dos mais importantes sistemas de abastecimento urbano do mundo, revertendo 33 m³ s⁻¹ para a região metropolitana de São Paulo. Além da quantidade destinada à região metropolitana de São Paulo, o sistema também é responsável por vazões complementares para os municípios a jusante localizados na bacia do rio Piracicaba.

O Sistema Cantareira possui uma área de aproximadamente 228 mil hectares (FIGURA 13), sendo que deste total, aproximadamente 52 mil hectares são Áreas de Preservação Permanente – APP's, (matas ciliares, topos de morros e áreas de grande declividade) todas elas áreas especialmente importantes para a manutenção da qualidade e quantidade de água do sistema como um todo. Deste total de APP's, mais de 70% (aproximadamente 38 mil hectares) em 2003, estavam alteradas de alguma

forma por usos antrópicos (WHATELY; CUNHA, 2007), não cumprindo a função ambiental que se esperaria delas.

Para Whately e Cunha (2007), de 1987 a 2004, quase todos os principais tributários do Sistema Cantareira, apresentaram tendência significativa de redução de qualidade de água, em pelo menos um dos parâmetros analisados. Fica evidente a importância ecológica desta região, como uma região “produtora de água” e a necessidade do desenvolvimento de incentivos econômicos para a restauração florestal das áreas antropizadas, assim como para a conservação das áreas ainda cobertas por florestas nativas, tornando esta região um local preferencial para a implementação dos primeiros projetos piloto do Programa “Produtor de Água” no país.

Figura 13 – Mapa de uso do solo Sistema Cantareira
Fonte: IRRIGART (2005)

No Comitê das Bacias PCJ, a proposta do “Produtor de Água” foi apresentada e debatida por diversas instâncias ao longo dos anos de 2006 e 2007. A primeira apresentação da proposta foi em 11 de agosto de 2006, para os membros da CT-Rural,

órgão do Comitê que discute prioritariamente os assuntos ligados ao setor rural, e que é formada majoritariamente por representantes do setor. A aceitação do conceito foi muito grande, pela primeira vez, se discutia uma possibilidade de remuneração aos produtores rurais. Após vários questionamentos e esclarecimentos quanto à viabilidade de implantação do programa, os membros da CT-Rural aprovaram-no e deliberou-se pela busca de possibilidade de sua implantação em sub-bacias hidrográficas críticas do PCJ (Reunião Ordinária da CT Rural, 2006). A partir desta apresentação, os membros da Câmara Técnica Rural, passaram a ser os principais apoiadores da proposta junto ao Comitê e tiveram papel fundamental em todo o processo de encaminhamento da mesma (VEIGA NETO, 2008).

Após uma série de debates com os membros da CT-Rural, foi aprovada por unanimidade, a inclusão do apoio à implementação de Projetos Piloto do “Programa Produtor de Água”, contemplando parcerias e as recomendações previstas no princípio “provedor-recebedor” por pagamentos por serviços ecossistêmicos relacionados com a água, nas Ações de Curto Prazo do Plano de Bacias 2004/2007, da BH-PCJ (Reunião Conjunta da CT-PL e CT-PB, 2006a), através da Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ, nº 051/06, de 28 de setembro de 2006. Esse fato foi considerado pelas instituições parceiras do projeto, o primeiro grande passo alcançado para a institucionalização do projeto junto ao Comitê. Após esta aprovação o projeto sofreu uma série de reformulações até que também se logrou incluir o projeto do município de Extrema, Minas Gerais (projeto este que será detalhado nos itens seguintes) tornando assim as iniciativas nos estados de São Paulo e Minas Gerais, executados sob o mesmo projeto final (VEIGA NETO, 2008).

O projeto reformatado foi apresentado em reunião da CT-Rural, em 27 de abril de 2007, e após várias discussões a CT-Rural aprovou a) o projeto, b) o termo de referência, e c) seu orçamento e cronograma. Indicando como tomador dos recursos a ONG internacional The Nature Conservancy – TNC (Reunião Ordinária da CT-Rural, 2007). O novo projeto foi também apresentado pelo representante da CT-Rural à Câmara Técnica de Planejamento. Em reunião desta Câmara, no dia 11 de junho de 2007, foi aprovado por unanimidade e maiores detalhes podem ser obtidos no site do Comitê: www.comitepcj.sp.gov.br.

As ações do programa são dirigidas prioritariamente aos produtores rurais, responsáveis pelo uso e manejo do solo. Os recursos financeiros (alocados mediante contratos individuais) serão liberados aos produtores para compensar parte de seus custos, com a implantação, parcial ou total, de ações e práticas conservacionistas para redução do risco de erosão e/ou com ações visando a recuperação da cobertura florestal nativa. A premissa adotada é que o apoio financeiro aos produtores rurais pelos serviços ambientais prestados garantirá a sustentabilidade do programa, sendo o proprietário rural o principal interessado em cumprir as metas estabelecidas para poder receber o apoio financeiro (CHAVES et al. 2004a).

ii) Objetivos do Programa “Produtor de Água ” implementado nas Bacias PCJ

No caso da Bacia PCJ, o Programa apresentado ao Comitê PCJ, foi denominado de *“Difusão e Experimentação de um Sistema de Pagamentos por Serviços Ambientais para restauração da “saúde ecossistêmica” de microbacias hidrográficas dos mananciais da sub-bacia do Cantareira”*. O projeto proposto ao Comitê PCJ, visa aplicar esse conceito através da implantação de um modelo de sistema de pagamentos por serviços ecossistêmicos, e tem como principais objetivos, segundo seus proponentes (CHAVES et al. 2004a; 2004b):

- a) Aplicar metodologia específica do Programa Produtor de Água nas microbacias do Cancã, em Joanópolis, SP; do Moinho, em Nazaré Paulista, SP; e das Posses, em Extrema, MG;
- b) Difundir e discutir o conceito de serviços ecossistêmicos;
- c) Difundir, na área de abrangência do Programa o conceito de manejo integrado do solo e da água através da conscientização e do incentivo à implantação de práticas conservacionistas e a preservação e recuperação de florestas nativas;
- d) Determinar o abatimento, por simulação, da sedimentação nos cursos d'água e comparar os resultados obtidos nas microbacias piloto com os resultados de microbacias testemunhas escolhidas da área de estudo do Programa;
- e) Avaliar a percepção do proprietário rural sobre serviços ecossistêmicos;

f) Treinar potenciais agentes replicadores do Programa em relação aos seus critérios e procedimentos na sub-bacia do Cantareira; e

g) Divulgar os resultados do Programa na área de abrangência do Sistema Cantareira.

iii) Definição de áreas prioritárias para a implantação do Programa “Produtor de Água” nas Bacias PCJ

O programa “Produtor de Água” que abrange a sub-bacia do Cantareira vem sendo realizada nas microbacias do Ribeirão do Moinho (1.756 ha) em Nazaré Paulista, Ribeirão Cancã (1.141 ha) em Joanópolis, ambas localizadas no estado de São Paulo e Ribeirão das Posses (1.200 ha), em Extrema, Minas Gerais. As microbacias paulistas foram escolhidas segundo critérios de seleção aprovados pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do PCJ, para a implantação de projetos demonstrativos de recuperação de matas ciliares no âmbito do Projeto de Recuperação de Matas Ciliares, desenvolvido pela Secretaria do Meio ambiente – SMA. Também estão inseridas no Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas, desenvolvido pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento – SAA e a Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI.

A microbacia mineira foi escolhida de acordo com critérios definidos pela Prefeitura de Extrema, na regulamentação da Lei Municipal, que cria o Programa “Conservador das Águas” (EXTREMA, 2005a).

Os critérios de seleção definidos pela Câmara Técnica de Recursos Naturais e referendados pelo plenário do Comitê PCJ consideram a importância da área para: a) a “produção de água” e para a conservação da biodiversidade, b) a existência ou o potencial de mobilização e organização de produtores, c) outras iniciativas para a recuperação de matas ciliares, d) a estrutura fundiária priorizando áreas com predominância de pequenas propriedades e maiores índices de pobreza, e) a fragilidade do meio e o tipo de atividade atual, e f) a priorização definida pelo plano da bacia (VEIGA NETO, 2008).

É importante ressaltar que as três microbacias indicadas estão localizadas em áreas prioritárias para a “produção de água”, conforme mapeamento efetuado pelo Comitê PCJ (FIGURA 14).

Figura 14 – Microbacias prioritárias para a “produção de água” nas bacias hidrográficas dos Rios PCJ
Fonte: Comitê PCJ (2006)

Os projetos das microbacias paulistas seguem as diretrizes e conceitos do Programa de Incentivo ao Produtor de Água, desenvolvido pela ANA, que como dito anteriormente, é um programa voluntário de restauração do potencial hídrico e do controle da poluição difusa no meio rural.

Nestes projetos são feitos pagamentos aos produtores rurais que, através de práticas e manejos conservacionistas e de melhoria da cobertura vegetal, contribuem para o aumento da infiltração de água e para o abatimento efetivo da erosão e da sedimentação, conforme metodologia baseada na Equação Universal de Perdas de Solo, e segundo o conceito provedor-recebedor (CHAVES et al. 2004a; 2004b). A Equação Universal de Perda de Solo é um modelo de predição de erosão amplamente utilizado na ciência agrônômica e por aqueles que trabalham com conservação de solo em todo o mundo:

$$A = R K L S C P \quad (4)$$

Em que:

A – Representa a perda de solo média anual na gleba de interesse ($\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$);

R – É a erosividade da chuva e da enxurrada ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$);

K – É erodibilidade do solo ($\text{t ha h ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$);

- L – É o fator de comprimento de rampa;
- S – É o fator de declividade da rampa;
- C – É o fator de uso e manejo do solo; e
- P – É o fator de práticas conservacionistas

Os pagamentos aos produtores estão embasados na realização das práticas recomendadas pelos técnicos participantes do Projeto, práticas estas relacionadas à conservação do solo e manutenção da qualidade e quantidade de água. Participam dos Projetos Piloto de Pagamento por Serviços Ecossistêmicos os produtores rurais (pessoas físicas ou jurídicas), devidamente inscritos no Cadastro de Produtores Rurais dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, propriedades encontram-se inseridas nas microbacias hidrográficas do Ribeirão do Moinho, em Nazaré Paulista, e do Ribeirão Cancã, em Joanópolis, conforme definição do Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas da CATI/SMA, no primeiro caso e na microbacia das Posses, em Extrema, no segundo caso (VEIGA NETO, 2008).

O programa “Produtor de Água” vem sendo conduzido pela ANA, a SMA do Estado de São Paulo e conta com a parceria estratégica da TNC.

2.1.3.9.2.2 O Projeto “Conservador das Águas” em Extrema, Minas Gerais

Nas BH-PCJ esta sendo implementado o projeto piloto “Conservador das Águas” inspirado também no Programa “Produtor de Água” proposto pela ANA.

O município de Extrema, criado em 1901, está situado no extremo Sul de Minas Gerais, distante 100 km da cidade de São Paulo. O município tem uma população de aproximadamente 20.000 habitantes e ocupa uma área de 243,7 km² (EXTREMA, 2005a). É um dos cinco municípios mineiros que integram as Bacias PCJ, e um dos principais contribuintes do Sistema Cantareira. Juntos, estes cinco municípios são responsáveis por 22 m³ s⁻¹, dos 33 m³ s⁻¹ de água, que são revertidos ao Sistema Cantareira para o abastecimento da área metropolitana de São Paulo.

O rio Jaguarí é o principal curso d’água que passa pelo município de Extrema, e corta o mesmo em toda a sua extensão, sendo responsável pelo abastecimento de toda a zona urbana. Sua nascente está localizada no município de Sapucaí Mirim, passando pelo Distrito de Monte Verde e entrando no município pelo bairro do Salto de Cima.

Seus principais afluentes são o rio Camanducaia e o ribeirão do Juncal, oriundos dos municípios de Camanducaia e Itapeva e os córregos que nascem na área do município, sendo os principais o Ribeirão do Salto de Cima, Ribeirão dos Forjos, Ribeirão das Furnas, Ribeirão Tenentes, Ribeirão do Matão e o Ribeirão das Posses (EXTREMA, 2005a). A FIGURA 15 mostra a distribuição das microbacias que tem Extrema e os rios que as compõem.

Figura 15 – Município de Extrema, MG
Fonte: Extrema (2005a)

O município de Extrema vem construindo, nos últimos anos, uma série de iniciativas referentes ao meio ambiente, das quais o projeto “Conservador das Águas” é a iniciativa mais recente, oficializada em agosto de 2007, a partir de uma Lei municipal promulgada em 2005, o projeto “Conservador das Águas” tem como objetivo fomentar a preservação de mananciais e nascentes no município, começando pela microbacia das Posses (por se tratar da mais degradada e com menor cobertura vegetal). As águas que saem dessa microbacia constituem um dos principais mananciais do sistema

Cantareira. O projeto conta com a parceria da Agência Nacional de Águas e de outras instituições municipais, estaduais e privadas (TABELA 3).

Tabela 3 – Função das instituições parceiras no projeto “Conservador das Águas”

Instituição	Função
Prefeitura Municipal de Extrema	Pagamentos por SE Mapeamento das propriedades Assistência técnica e gerenciamento do projeto
Comitê das Bacias PCJ	Apoio às ações de conservação do solo e pagamento aos produtores rurais
Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG)	Financiamento dos insumos (cercas, adubos, calcáreo, herbicidas); apoio no processo de comando e controle e averbação das Reservas Legais das propriedades rurais
The Nature Conservancy (TNC)	Apoio técnico e financeiro

Fonte: Prefeitura Municipal de Extrema – PME (2008)

A parceria com a TNC permite que ao longo da execução do projeto haja a assistência técnica e o apoio financeiro aos proprietários rurais para que lhes permita recuperar e preservar suas Áreas de Proteção Permanente (APPs) e Reserva Legal (RL), bem como recobrir a vegetação local, proteger os mananciais, fazer o saneamento ambiental e conservação do solo.

O apoio do comitê de bacia hidrográfica PCJ é proveniente dos recursos arrecadados com a cobrança pelo uso da água, estipulado pelo comitê, que se baseia no princípio do poluidor-pagador ou usuário-pagador, segundo o qual, os custos pela prevenção ou recuperação de possíveis danos ambientais devem ser arcados pelo usuário/poluidor. De acordo com esse mecanismo a sociedade, empresas e outros usuários dos serviços ecossistêmicos de manutenção dos recursos hídricos arcam com os custos de preservação e manutenção dos ecossistemas por aqueles que preservam os ecossistemas diante de sua relação harmônica com o meio ambiente.

Em 2005 a prefeitura de Extrema aprovou a Lei municipal 2.100 de 21 de dezembro de 2005 e seus regulamentos: os Decretos nº 1.703/06 e nº 1.801/06, (EXTREMA, 2005b) que criou o Projeto Conservador das Águas. De acordo com essa

Lei o apoio financeiro aos proprietários rurais que aderirem ao Projeto Conservador das Águas, se daria através da execução de ações referente às metas de:

a) Adoção de práticas conservacionista de solo, com a finalidade de abatimento efetivo da erosão e da sedimentação;

b) Implantação de Sistema de Saneamento Ambiental com a finalidade de dar tratamento adequado ao abastecimento de água, tratamento de efluentes líquidos e disposição adequada dos resíduos sólidos das propriedades rurais; e

c) Implantação e manutenção da cobertura vegetal das Áreas de Preservação Permanente, e da Reserva Legal através da averbação em cartório, ambos conforme consta do Código Florestal e Legislação Estadual de Minas Gerais.

O Decreto nº 1.703/06 também estabelece que o produtor rural, potencial beneficiário do Projeto, deve: a) ter seu domicílio na propriedade rural ou inserido na sub-bacia hidrográfica trabalhada no projeto; b) ter propriedade com área igual ou superior a dois hectares; e c) desenvolver atividade agrícola com finalidade econômica na propriedade rural.

Os proprietários que aderiram ao projeto recebem como pagamento por serviços ambientais a quantia referente a 100 Unidades Fiscais de Extrema (R\$ 169,00) por hectare ano⁻¹, dividido em 12 parcelas. (Prefeitura Municipal de Extrema – PME, 2008). Em princípio, todos os proprietários que se comprometerem com as metas e critérios mencionados acima são habilitados para o programa, entretanto a viabilidade de adesão depende da viabilidade financeira do programa.

Até agosto de 2009 os resultados do programa apontaram a participação de 60 proprietários de terra no município no programa (60 contratos assinados), totalizando 1.393,49 hectares beneficiados. Recebem uma quantia que varia de R\$ 75 a R\$ 169 por hectare ano⁻¹ por práticas de conservação do solo e manutenção de matas, dentre elas, a adoção de práticas conservacionista de solo e estradas vicinais. Com finalidade de abatimento da erosão; a plantação de 120.000 árvores nas propriedades, a construção de 100.000 metros de cercas e 1.000 bacias de captação (PREFEITURA MUNICIPAL DE EXTREMA – PME, 2008).

2.1.3.10 O pensamento sistêmico e a dinâmica de sistemas

Nessa seção, tem-se como objetivo apresentar os conceitos teóricos empregados para a abordagem do problema de estudo, relativos ao “Pensamento Sistêmico – PS” e à “Dinâmica de Sistemas – DS” que é uma forma de Pensamento Sistêmico.

A DS pode ser considerada como uma nova linguagem que permite expressar mais adequadamente as cadeias de eventos circulares existentes na natureza, analisando-os de forma integrada. Esse fato é importante posto que o isolacionismo foi responsável pelo efeito positivista que sustentou a Ciência moderna. Tal situação foi manifestada pelo aspecto científico de “neutralizar” as influências externas para que haja um “controle” preciso das medições e dos experimentos realizados na produção de conhecimentos (CAPRA, 1996). O que se pode observar, é que esses “aspectos importam à compreensão da visão de mundo hegemônica da presente sociedade, refletindo na separação sociedade versus natureza, na postura antropocêntrica e individualista de dominação do homem sobre a natureza”. Como consequência, a história do mundo e do pensamento ocidental foi comandada por um paradigma de disjunção, de separação. Separam-se as disciplinas, as ciências, as técnicas. Separou-se o sujeito do conhecimento do objeto do conhecimento. Assim, vive-se em um mundo em que é cada vez mais difícil estabelecer ligações (CAPRA, 1996).

Segundo Capra (1996), quanto mais são pesquisadas as questões ambientais, maior a consciência que se passa a ter de que elas não podem ser compreendidas isoladamente, por serem sistêmicas, interconectadas e interdependentes. De acordo com Senge (1990), grande parte dos problemas hoje existentes, em todo o mundo, está associado ao descaso e desconhecimento humano de entender e controlar sistemas cada vez mais complexos.

A DS permite expressar mais adequadamente as cadeias de eventos circulares existentes na natureza. Por intermédio da modelagem, utilizando-se de diversos tipos de diagramas (causais, estoque e fluxo), é possível expressar graficamente um sistema, possibilitando perceber mais claramente a complexidade dinâmica das relações entre as partes do mesmo (VILLELA, 2007). O fundamento da DS assenta-se nos conceitos do pensamento sistêmico, onde o princípio da interdependência demanda que

mudanças em qualquer um dos componentes de um determinado sistema, direta ou indiretamente, estão associadas ou afetarão os demais componentes.

2.1.3.10.1 O pensamento sistêmico – PS

A teoria do sistema apresenta um novo modo de pensar, o chamado “pensamento de sistema” ou “pensamento sistêmico”, significando pensamento em termos de relações, união e contexto (GUNTER, 1999).

O contexto teórico subsequente ao da ecologia é a teoria dos sistemas vivos, que só atualmente está sendo mais amplamente desenvolvida. No entanto, está arraigada em vários ramos da ciência, compondo um complexo integrado sistema, cujas características não podem ser reduzidas àquelas das partes menores. A natureza representa o modelo ideal desses sistemas. Compreendendo-se ecossistemas, compreendem-se também relações, que constituem o aspecto central do pensamento sistêmico. Conseqüentemente, a atenção é deslocada de objetos para relações (GUNTER, 1999). Quando se observam ecossistemas, constata-se que todos seus organismos têm sua função. Contudo, eles também produzem detritos exatamente como o homem; porém são dinamicamente transformados (o detrito de uma espécie serve de fonte de alimento para outra, de modo que em um ecossistema, praticamente todos os detritos são reciclados continuamente).

Para Gunter (1999) a forma de organização da natureza serve de modelo para as organizações humanas, não entanto, esses modelos não devem ser concebidos como uma soma mecânica de partes, eles constituem algo mais.

Para Griffith (2001), o uso da modelagem conceitual pode contribuir para o entendimento do funcionamento dos ecossistemas, o que facilita procedimentos de gestão ambiental, mesmo em situações extremamente complexas como aquelas relacionadas à gestão dos recursos hídricos. A partir da modelagem de uma determinada área, e com a possibilidade da realização de simulações, o seu funcionamento fica mais bem visualizado e as soluções para as intervenções necessárias são concentradas nos pontos mais vulneráveis, irradiando-se soluções por toda a estrutura do sistema.

Harrison e Shirom (1999) asseguram que no pensamento sistêmico, o princípio da interdependência demanda que mudanças em qualquer um dos componentes de um

determinado sistema, direta ou indiretamente, estão associadas ou afetarão os demais componentes. Por este motivo, as informações existentes dentro desse sistema, provocam a sua retroalimentação interna e nas suas relações com o meio no qual está inserida, podendo alcançar as mudanças desejáveis propostas, ou mostrar o direcionamento necessário para que lacunas diagnosticadas dentro do atual modelo sejam alteradas, atingindo, assim, os resultados esperados.

O enfoque sistêmico é uma disciplina preocupada por ver totalidades dentro das estruturas subjacentes aos problemas analisados. Observam-se as inter-relações existentes entre as variáveis que representam o problema de estudo. Procuram-se padrões de mudança, mais do que representações estáticas, estudam-se processos e não objetos. Segundo Simonovic (2000) o pressuposto básico do PS é o comportamento dinâmico que um sistema apresenta reproduzido pela própria estrutura.

O PS é uma forma de apreender a realidade através da articulação das interconexões complexas de causalidades circulares que circundam a realidade na qual vivemos, permitindo também avaliar nossas decisões. Abarca uma diversa e heterogênea quantidade de métodos, ferramentas e princípios usados para examinar as inter-relações entre as forças que constituem um processo, pois o comportamento de todos os sistemas é governado por certos princípios universais.

Segundo Senge (1997) o PS é um marco conceitual, um corpo de conhecimentos e ferramentas, desenvolvido para evidenciar os padrões de comportamento de um sistema, conhecidos ditos padrões podem ser alterados caso for necessário. Os diagramas causais ou de influência, os arquétipos e os modelos, são ferramentas utilizadas pelo PS. Estas ferramentas permitem estabelecer de forma clara as inter-relações embasadas no conceito teórico dos processos de retroalimentação.

Pode-se dizer que o PS é uma disciplina preocupada por ver totalidades, permitindo então, observar as estruturas internas subjacentes nas situações complexas. A chave do pensamento sistêmico é a alavanca ou ponto de apoio onde as políticas e modificações feitas na estrutura de um sistema levam a melhorias importantes e duradoras no mesmo. Os arquétipos sistêmicos são as estruturas que continuamente se repetem, essa repetição ajuda a seu entendimento e à localização do ponto de alavancagem.

As conceitualizações sistêmicas ajudam a entender como abordar problemas complexos que afetam ou envolvem pessoas. Dentro da análise sistêmica encontram-se ferramentas que facilitam a procura de respostas boas e criativas para solucionar as problemáticas, enfatizando que nem sempre se procura a melhor solução. A FIGURA 16 mostra a essência, princípios e práticas do pensamento sistêmico.

Figura 16 – Essência, princípios e práticas do pensamento sistêmico
Fonte: Senge (1995)

Para Senge (1990) a falta de capacidade humana para entender e analisar sistemas complexos gera muitos dos problemas que se dão na realidade. A fim de superar isso, ele propõe o uso das técnicas do pensamento sistêmico. Técnicas embasadas em modelos mentais, que geralmente refletem as crenças, teorias, conhecimentos e pressupostos de cada um sobre como operam os sistemas na realidade. É através da DS (uma forma do PS) que tais modelos mentais transformam-se em processos computacionais que podem decifrar as conseqüências da interação entre diferentes partes de um sistema. Para Aracil (1986) esses modelos corrigem-se e aperfeçoam-se através de um processo de aprendizado. Segundo esse autor a DS pode então ser entendida como uma metodologia de simulação computadorizada.

Segundo Richardson (1991), a DS está projetada para o entendimento de problemas de grande complexidade caracterizados por serem dinâmicos (incluem quantidades que variam em função do tempo), e por terem relações de feedback ou

retroalimentação. Aracil (1986) afirma que a característica principal da DS consiste em que a estrutura do modelo não está definida e determinada pelo formulador do mesmo e seu objetivo primordial é evidenciar o funcionamento e performance do sistema no tempo.

O uso da DS vem provando seu potencial como ferramenta auxiliar em várias áreas do conhecimento. Desde os modelos urbanos e globais de Forrester e Collins na década de 1960 e 1970 aos "simuladores de vôos gerenciais", que vêm sendo usados nas grandes corporações ao redor do mundo (VILLELA, 2007). De acordo com esse mesmo autor, os primeiros estudos e conceitos sobre Dinâmica de Sistemas foram propostos e desenvolvidos na década de 1950 pelo engenheiro eletricitista Jay Forrester na escola de administração "Sloan School of Management" do MIT ("Massachusetts Institute of Technology"). Forrester trabalhou durante a II Guerra Mundial no Laboratório de Servomecanismo do MIT, para as forças armadas americanas, desenvolvendo controles automáticos para armamentos militares. Percebeu que a teoria do controle e servomecanismos, bastante desenvolvida na engenharia elétrica, poderia ser útil em outras áreas do conhecimento como as ciências econômicas e sociais.

Em 1961, Forrester publicou o livro "*Industrial Dynamics*" que se tornou o marco conceitual da disciplina que hoje se conhece como Dinâmica de Sistemas. Entretanto, foi por intermédio do contato de Forrester com o ex-prefeito de Boston, John F. Collins, que trabalhava na época (1968) como professor visitante no MIT, que a disciplina começou a provar sua real utilidade nos famosos modelos de estudos estratégicos urbanos e mundiais, editados nos dois "best sellers": "Urban Dynamics" e "World Dynamics".

O avanço maior se deu posteriormente quando Peter Senge, orientado de Forrester, trabalhou na década de 1970 na realização de seminários com executivos, introduzindo a prática do pensamento sistêmico dinâmico nas grandes organizações. Hoje, o trabalho de Senge consolida-se como uma metodologia de administração de empresas que utiliza basicamente o ferramental de Dinâmica de Sistemas e é conhecida como "Organizações que aprendem" e "Pensamento sistêmico". Senge lançou em 1990, seu famoso "best seller" "A Quinta Disciplina - Arte e Prática da Organização que Aprende". A "quinta disciplina" referenciada na obra de Senge é o

pensamento sistêmico que utiliza todo o ferramental metodológico desenvolvido por Forrester na década de 1950 e estruturado no início da década de 1960 no livro “Industrial Dynamics”.

2.1.3.10.2 O círculo de causalidade ou diagrama de influência para representar esquemas mentais

Para representar nossos mapas mentais são usados os círculos de causalidade ou diagramas de influencia, constituídos por relações de causa-efeito entre as variáveis principais de um sistema. Compreendem, ademais, as estruturas de retroalimentação ou feedback responsáveis pela dinâmica sistêmica.

Assim, o círculo de causalidade é uma das ferramentas do pensamento sistêmico por meio do qual é possível expressar graficamente o comportamento, ao longo do tempo, das diversas variáveis envolvidas em uma dada questão. É composto por variáveis - palavras ou frases curtas que resumem os fatos envolvidos no problema estudado - conectadas por meio de setas que indicam o sentido da alimentação do ciclo ou da influência das variáveis. Os sinais “+” e “-” indicam, respectivamente, se o movimento de alimentação está no mesmo sentido da influência original ou se está em sentido oposto (FIGURA 17).

A letra “B” indica se está ocorrendo um processo de balanceamento, a letra “R” indica se está ocorrendo reforço (NARDELLI; GRIFFITH, 2000), como pode ser observado na FIGURA 17 que representa a estrutura do sistema dos recursos hídricos, em estudo realizado por Sánchez-Román et al. (2010) para analisar a sustentabilidade do recurso água na região das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.

Figura 17 – Diagrama de influência do sistema de recursos hídricos nas BH-PCJ
 Fonte: Sánchez-Román et al. (2010)

Para Senge (1990) e Anderson e Johnson (1997), os círculos de causalidade consistem de variáveis que podem aumentar ou diminuir no transcorrer do tempo, interligadas por conectores (arcos com setas) que indicam direção ou sentido de causalidade. Há duas possíveis relações entre as variáveis: na primeira, uma variável aumenta (ou diminui) enquanto a outra também aumenta (ou diminui). Alternativamente, na segunda situação, uma variável aumenta (ou diminui) enquanto a outra diminui (ou aumenta). No primeiro caso, o sinal é positivo (“+”); no segundo, negativo (“-”).

O círculo de causalidade elaborado para um sistema permite a visualização do conjunto de inter-relações existente entre todos os aspectos que o compõem.

Segundo Santos (1982) o princípio elementar do estudo sistêmico é o da conectividade. O sistema é entendido como um conjunto de elementos com ligações entre si e o ambiente que o circunda. Cada sistema compõe-se de subsistemas, e todos formam parte de um sistema maior, cada um é autônomo e simultaneamente aberto e integrado ao meio, tendo inter-relação direta com este. No entanto, há de se considerar, que os diagramas de influencia são muito bons para representarem qualitativamente as relações de causa e efeito que ocorrem em um sistema complexo. Entretanto, quando se necessita representar quantitativamente estas mesmas relações de causa e efeito, os modelos causais não são adequados. Para isto, usam-se os Modelos de Estoque e Fluxo. Estes são semelhantes aos modelos causais, com a

diferença de que as relações são expressas por intermédio de fórmulas lógico-matemáticas (VILLELA, 2007).

O ponto de partida para a construção de modelos de simulação dinâmica são os diagramas de influência ou círculos de causalidade. Constituem-se a principal ferramenta do pensamento sistêmico. Em função desta ótica é possível inferir que o mundo funciona através de loops de retroalimentação de reforço (R) e de balanço (B). O movimento conjunto desses loops indica o comportamento geral do fenômeno em estudo (GRIFFITH; TOY, 2005).

2.1.3.10.3 Modelo analítico

A metodologia usada na construção do modelo, objeto da presente pesquisa é a dinâmica de sistemas (modelagem e simulação), projetada para modelar e analisar sistemas biofísicos e socioeconômicos complexos. Esse enfoque é empregado em diversas áreas do conhecimento incluído aquelas relacionadas i) ao meio ambiente sustentável global (MEADOWS et al., 1982; FORRESTER, 1971); ii) assuntos sobre o desenvolvimento sustentável regional (SAEED, 1994; BACH; SAEED, 1992); iii) gestão ambiental (MASHAYEKHI, 1993); iv) modelagem ecológica (WU et al., 1993) e v) planejamento dos recursos hídricos (FORD, 1996).

A metodologia de DS tem como base o entendimento dos processos físicos, químicos, biológicos e socioeconômicos e das políticas administrativas que interagem para gerar o comportamento dinâmico das variáveis de interesse. A totalidade das relações entre esses componentes conforma a estrutura de qualquer sistema, tal estrutura opera ao longo do tempo e gera padrões próprios de comportamento dinâmico (como crescimento exponencial ou decrescente, colapso ou flutuações, crescimento em formato de S, etc.). O propósito clássico de um estudo de dinâmica de sistemas é o entendimento de como e porque a dinâmica é gerada e procurar as políticas para melhorar a situação. Tais políticas referem-se no longo prazo, as tomadas de decisão no nível macro pelos responsáveis da gestão de recursos.

Quando se conhece o Princípio de Sistemas, aprende-se a importância da modelagem para que o ser humano possa melhor compreender a natureza. Os modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma

visão dinâmica de complexos processos nos sistemas ambientais. É por intermédio dos modelos que os homens têm tentado dominar e descrever a natureza, ao mesmo tempo em que desenvolve mais tecnologias. A gestão de recursos hídricos, demanda a aplicação de modelos para estudos, em face à complexidade do ambiente em corpos d'água naturais.

Para Rosman (2006), dados ambientais são em geral escassos, e paradoxalmente imprescindíveis para estudos, projetos, diagnósticos, gestão e gerenciamento de corpos d'água naturais. Razão pela qual, é fundamental dispor-se de ferramentas confiáveis que permitam que tais dados sejam interpolados e extrapolados, tanto no espaço quanto no tempo. Dessa forma, por meio de modelos, pode-se interpolar e extrapolar, espacial e temporalmente, as informações obtidas a partir da análise nos poucos pontos onde os dados foram medidos, para toda a área de interesse. A extrapolação temporal pode ser interpretada como a simulação de novos cenários. Neste caso, modelos podem ser usados tanto para prever impactos de modificações a ser introduzidas no meio, quanto para prever situações com cenários diferentes dos que ocorreram nas situações de medições.

Neelamkavil (1987) classifica os modelos em: i) físico (estático ou dinâmico); ii) simbólico (matemático ou não matemático); e iii) mental. Modelos simbólicos matemáticos que se subdividem em dinâmicos e estáticos. O presente estudo baseia-se nos modelos matemáticos dinâmicos, usualmente descritos por equações diferenciais ou de diferenças. Segundo Bassanezi e Ferreira Jr. (1988), equações diferenciais são equações de variações instantâneas, de fenômenos que se desenvolvem continuamente; enquanto equações de diferenças são funções de uma rede de pontos, nas quais as variáveis envolvidas foram discretizadas, ou seja, têm-se as médias das variações.

Os modelos de simulação dinâmica são descrições abstratas do mundo real que permitem representar problemas complexos caracterizados por sua dinâmica, não-linearidade, relações de retroalimentação e defasagens em tempo e espaço (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2010; WIAZOWSKI et al., 1999). Um modelo de simulação dinâmica deve ater-se a capturar somente os fatores essenciais de um sistema real e deve abstrair-se dos demais fatores. O uso principal dos modelos é o de comunicar um

ponto de vista do mundo, não procuram ser a realidade com exatidão de detalhes, mas procuram se aproximar dela. Esta característica dos modelos permite compreender um problema específico, e visa prever o comportamento do sistema. O pressuposto fundamental da Dinâmica de Sistemas é o de que o comportamento simulado por um modelo emerge da estrutura causal que lhe está subjacente (SÁNCHEZ-ROMÁN et al.; 2010).

Na pesquisa científica, os modelos são utilizados para tentar compreender o mundo real e a estrutura lógica dos sistemas. Tenta-se prever o estado futuro ao que poderia levar um processo dinâmico qualquer. Outra aplicação é o de para “controlar” o comportamento de um sistema para obter uma condição desejada ao final. Contudo, o usuário deve estar sempre consciente das limitações do modelo que está utilizando. Dessa forma, a informação disponível é um insumo de fundamental importância (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2010).

Para Sánchez-Román et al. (2010) existem diversas formas de utilizar modelos de simulação para focar um problema, já que podem ser construídos e orientados para tomadores de decisões ou para pesquisadores, sendo as suas funções diferentes. Em outras situações, não existe o modelo e, portanto é preciso criá-lo e gerar as equações que o representem. Contudo, quando se participa de todas as fases de construção de um modelo, compreensão do problema particular que está sendo modelado é maior.

2.1.3.10.4 Princípios da dinâmica de sistemas

A dinâmica de sistemas embasa-se em três princípios fundamentais:

i) Existência de laços de retroalimentação ou feedbacks: a retroalimentação é um conceito básico para entender o comportamento dinâmico de determinado sistema.

De acordo com Forrester (1961), existe retroalimentação quando o meio ou situação na qual se encontra um sistema leva a uma decisão que resulta numa ação que influi no meio antes citado e em consequência nas decisões futuras. Richardson (1991), de uma forma mais simples, afirma que a retroalimentação é a transmissão e retorno da informação. Isto ocasiona de maneira genérica duas classes de sistemas: os sistemas abertos e os sistemas fechados. Nos sistemas abertos, os resultados não influem nos insumos que os geraram, ou seja, não existe retroalimentação. No entanto,

nos sistemas fechados os resultados influem nos insumos que os geraram, voltando a ter também, influencia sobre os resultados, existindo nesse caso retroalimentação.

As relações entre as variáveis se refletem nos laços de retroalimentação, que representam cadeias fechadas de relações causais. Todo modelo esta constituído por um ou mais laços de retroalimentação que interagem entre si, o que explica o comportamento das variáveis que não poderia ser explicado através de uma relação linear.

Existem dois tipos de laços de retroalimentação: os laços de retroalimentação positiva ou de reforço (+), e os laços de retroalimentação negativa ou de balanço (-).

Os laços de retroalimentação (+) caracterizam-se pela variação de um elemento que se difunde ao longo do laço, reforçando a variação inicial, gerando assim o crescimento exponencial do sistema. Nesses laços (+) todo movimento é ampliado provocando mais movimento no mesmo sentido, como apresentado na FIGURA 18a.

Nos laços de retroalimentação negativa (-), a variação de um elemento se transmite ao longo do laço gerando uma variação que se contrapõe à variação original visando à estabilidade do sistema como mostra a FIGURA 18b.

(a)

(b)

Figura 18 – Laço de retroalimentação: (a) positiva e (b) negativa
 Fonte: Senge (1995)

ii) Existência de não-linearidade entre as variáveis: a clássica visão linear se caracteriza por focar a atenção nas relações causa-efeito entre as variáveis. A dinâmica de sistemas, em contraposição tem uma visão holística da forma como as variáveis se relacionam entre si.

O enfoque sistêmico procura ter uma visão global da realidade, tentando fazer análises do conjunto, ou seja, como uma totalidade visando assim tomar decisões e estabelecer políticas que considerem a influência que tem umas variáveis sobre as outras.

iii) Existência de atrasos nas relações entre variáveis: Quando se trabalha com sistemas dinâmicos, é importante lembrar que podem existir retardos materiais ou de informações. A existência desses atrasos ou demoras significa que as decisões

tomadas com anterioridade não vão produzir efeitos de forma imediata o que complica a detecção das relações causa-efeito, devido a que os sintomas apareceram, freqüentemente, distantes no tempo e no espaço da ação que os gera (FORRESTER, 1961). Tornando difícil ou quase impossível estabelecer as relações de causa e efeito.

É importante ressaltar que as mudanças necessitam tempo para ter efeito, estes não são instantâneos. De forma geral, os impactos das decisões se observam no longo prazo, razão pela qual em certos momentos, enfrentam-se problemas originados por decisões passadas. O tempo converte-se numa variável fundamental no estudo do comportamento de um sistema dinâmico, pois o referido sistema sofre evolução ao longo do mesmo. Muitas das decisões tomadas podem ser incorretas e causar efeitos contraproducentes se é subestimado o período de duração do atraso. As demoras na transmissão de informações ou de fluxos devem ser observados de forma cuidadosa (HAMILTON, 1980).

2.1.3.10.5 Etapas para a construção de um modelo de simulação dinâmica

Para Ford (1999), o processo de modelagem em Dinâmica de Sistemas, consiste nas seguintes etapas consecutivas: i) identificação do modelo em estudo e definição do problema de forma concisa, precisa e clara; ii) determinação dos fatores que parecem interagir e criação dos sintomas observados no problema; iii) elaboração dos círculos de realimentação de informação de causa-efeito chamados de diagramas de influência, que unem decisões e ações; iv) construção de diagramas de estoques e fluxos; v) elaboração de um modelo matemático que reflita o real funcionamento do sistema em estudo; vi) estimativa dos parâmetros do modelo; vii) simulação e contraste dos resultados com a realidade; e viii) realização de análises de sensibilidade e evolução do impacto de novas políticas e regras que determinam as decisões a tomar.

Segundo Forrester (1961), as etapas para desenvolver um modelo de Dinâmica de Sistemas devem ser: i) identificação do problema a estudar e as perguntas que deverão ser respondidas; ii) determinação das inter-relações entre os elementos do sistema; iii) descrição do problema em linguagem matemática; iv) simulação do modelo; v) interpretação dos resultados; e vi) revisão do sistema e experimentação. Para esse autor é importante não esquecer aonde se quer chegar com o modelo e conhecer quais

caminhos levam à construção de um sistema que contenha as variáveis essenciais que representam a realidade que se pretende estudar.

Sintetizando, é possível resumir as etapas de desenvolvimento de um modelo de dinâmica de sistemas em três principais etapas: i) etapa de conceitualização; ii) etapa de formalização e por último iii) etapa de avaliação e exploração (simulação).

2.1.3.10.6 O software STELLA e a modelagem e simulação dinâmica

Entre os diversos softwares existentes no mercado para transformar diagramas de influencia em modelos computacionais, tem-se entre outros, o POWERSIM, o VENSIN, o SIMILE, o I THINK, e o STELLA: “Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation”. Este último escolhido para desenvolver o modelo de simulação objeto desta pesquisa.

O STELLA trabalha com programação orientada a objetos (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2010) onde cada ícone utilizado tem uma função específica, na configuração de estruturas ou diagramas representativos do modelo matemático empregado para representar os fenômenos estudados. A forma de organização dos elementos está associada diretamente à dinâmica de sistemas e o enfoque sistêmico, os quais possibilitam que digramas do modelo e seus algoritmos possam representar subsistemas inseridos num sistema global e as inter-relações entre eles.

O STELLA utiliza símbolos empregados para representar as variáveis que conformam os modelos (FIGURA 19).

Figura 19 – Símbolos utilizados pelo software STELLA na representação de um estoque; fluxos com taxa de entrada e de saída; conector de informação inicial; conector; conversor ou variável auxiliar; variável gráfica e variável fantasma

Fonte: Stella (2001)

Têm-se três tipos de variáveis num modelo de DS: variáveis de nível ou estoque; variáveis de fluxo e os conversores ou variáveis auxiliares.

As variáveis de nível ou estoque são representadas por retângulos e são variáveis de estado que expressam as principais acumulações no sistema. As variáveis de fluxo são indicadas por válvulas e mostram as taxas de mudança nas variáveis de estoque que refletem as atividades que enchem ou esvaziam os estoques. Já os conversores, indicados por círculos, são variáveis intermediárias utilizadas para efetuar distintos cálculos. Além do mais, um modelo possui conectores representados por setas que sinalizam as relações de causa-efeito intrínsecas à estrutura do modelo. Em decorrência das características dessas últimas podem-se classificar os conectores em: conectores de defasagem, de informação inicial e de informação (STELLA, 2001).

No programa STELLA, os estoques constituem as variáveis que se acumulam no sistema e são considerados como reservatórios. Derivam-se da diferença entre os fluxos de entrada e saída. As variáveis de fluxo explicam as variações dos estoques através do tempo e são descritas por equações algébricas.

Dentre as variáveis complementares, encontram-se as auxiliares, freqüentemente usadas para efetuar manipulações algébricas. Possuem valores constantes, podendo ter também valores baseados em outras variáveis. São representadas por círculos, cujo aspecto varia de acordo a função que representam. As variáveis temporais têm seus valores associados ao tempo de simulação, conseguindo efetuar cálculos em função de informações defasadas no tempo, sendo chamadas nesse caso variáveis de defasagem. As variáveis fantasmas são cópias de outras e tratam de facilitar a construção e visualização do modelo. Com o mesmo objetivo usam-se também as variáveis vetoriais representando elementos sujeitos às semelhantes ações. As variáveis gráficas expressam relação entre uma variável de insumo e uma de resultado. Indicam de forma específica como uma variável de resultado muda em correspondência a mudanças na variável de insumo (STELLA, 2001).

Segundo Forrester (1980) qualquer sistema do mundo real pode ser representado por duas únicas estruturas, a saber: estoques e fluxos. Os estoques respondem pela descrição do comportamento do sistema, já os fluxos são variáveis que levam o sistema a seu estado futuro.

Optou-se por utilizar o programa computacional STELLA pelo fato deste ser freqüentemente usado por pesquisadores que trabalham com o enfoque de DS na modelagem de problemas complexos que integram variáveis diversas. De acordo com Orellana Gonzalez (2006) é necessário considerar que STELLA foi o primeiro software projetado para trabalhar com variáveis físicas, bem como biológicas, econômicas e sociais. Sabe-se que um modelo de recursos hídricos deve considerar todos estes tipos de variáveis (STELLA, 2001).

O STELLA permite a construção de diversas classes de modelos. Transforma modelos mentais em diagramas computadorizados, simulando situações reais de sistemas ecológicos dinâmicos, ao mesmo tempo em que possibilita a compreensão de diversas funções matemáticas e a leitura das saídas gráficas correspondentes (DUVOISIN, 2000; FERRACIOLI; CAMILETTI, 1998; RICHMOND, 1987). Pode-se dizer que trata-se de um laboratório, sobre processos reais, a fim de apoiar a tomada de decisões. Ao executar-se o Ambiente STELLA é apresentada ao usuário a tela ao Nível Construção de Modelos (FIGURA 20).

Figura 20 – Tela de construção de modelos no ambiente computacional STELLA
 Fonte: Gonçalves e Ferracioli (2006)

2.1.3.10.7 Utilidade da dinâmica de sistemas

Segundo Forrester (1994), a dinâmica de sistemas evidencia a forma em que as ações implementadas no presente incidem no desempenho futuro de um sistema. A partir disso é possível identificar os caminhos que possam levar à melhoria de um sistema, observando as dificuldades causadas no desempenho deste durante o processo de simulação.

Pidd (1996) afirma que os sistemas dinâmicos podem ser usados para reforçar a importância da retroalimentação existente nos sistema e para entender seu comportamento auxiliando na identificação de formas mais adequadas de manejo dos mesmos.

A DS é um enfoque que pode evidenciar as interdependências existentes num sistema. Através da DS é possível identificar também a existência de soluções alternativas e as possibilidades de aplicá-las a determinado assunto. Por outro lado, permite observar se as decisões tomadas geram conseqüências indesejadas em outras áreas do sistema estudado. O grande potencial da DS consiste em tratar-se de uma modelagem dinâmica, focada no tempo, o que possibilita a identificação das conseqüências de decisões adotadas, que podem produzir-se no curto, médio e longo prazo (ORELLANA GONZALEZ, 2006).

Dentro outras vantagens do uso da metodologia de dinâmica de sistemas, Sterman (2000), aponta para: i) a possibilidade de estudar relações entre macro e micro estruturas e os efeitos respectivos dentro do sistema; ii) a modelagem e solução de problemas reais que compreendem elementos físicos, biológicos e econômicos; e iii) a melhoria no desempenho ou performance por intermédio da experimentação.

De acordo com Villela (2007) a DS é útil na identificação das características básicas de qualquer sistema estabelecendo: as relações de causa e efeito; o tempo de resposta; e os efeitos da retroalimentação.

Para Richardson (1991), as principais características da dinâmica de sistemas são: i) definição dos problemas em forma dinâmica; ii) tem como foco as características intrínsecas dos sistemas; iii) conceitualização de sistemas reais através da contínua interconexão de círculos de retroalimentação e causalidade; iv) identificação de estoques e fluxos de entrada e saída; v) formulação de um modelo comportamental que pode reproduzir a mecânica do problema; vi) entendimento e esclarecimento dos efeitos que sobre o modelo tem as mudanças nas políticas; e vii) implementação de mudanças e de novas políticas fundamentadas nesses entendimentos.

A FIGURA 21 apresenta os diferentes tipos de modelos possíveis de serem estudados com dinâmica de sistemas.

Figura 21 – Classes de modelos possíveis de serem estudados com Dinâmica de Sistemas
Fonte: Forrester (1994)

Um modelo que seja teoricamente bem fundamentado transforma-se numa estrutura útil (capaz de reproduzir os padrões de comportamento conhecidos do problema em análise). Essa mesma estrutura pode ser posteriormente utilizada para testar e avaliar, no ambiente virtual do programa de modelação, as soluções alternativas de resolução do problema no sistema real.

Considerando-se os desafios atuais da pesquisa na concepção e implementação de ferramentas e processos mais eficazes para cada contexto de decisão, o presente estudo visa especificar o papel da modelagem dinâmica como plataforma de participação aplicada à gestão da estratégica da água. Resultados de diversos estudos revelaram que a modelagem promove a aprendizagem sobre os problemas e aumenta a capacidade dos atores sociais de integrar conhecimentos e lidar com a complexidade subjacente à dinâmica das interações entre os sistemas social, econômico e ecológico.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área de estudo

O modelo de valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos (MOVA) desenvolvido na presente pesquisa tem sido aplicado na sub-bacia das “Posses”, localizada no município de Extrema, Minas Gerais. Esse município forma parte das BH-PCJ.

As BH-PCJ possui uma área de 15.303,67 km², sendo 92,6% no Estado de São Paulo e 7,4% no Estado de Minas Gerais (MG). Situa-se entre os meridianos 46° e 49° O e latitudes 22° e 23,5° S, apresentando extensão aproximada de 300 km no sentido Leste-Oeste e 100 km no sentido Norte-Sul.

No Estado de São Paulo, as Bacias PCJ, todas afluentes do Rio Tietê, estende-se por 14.137,79 km², sendo 11.402,84 km² correspondentes à Bacia do Rio Piracicaba, 1.620,92 km² à Bacia do Rio Capivari e 1.114,03 km² à Bacia do Rio Jundiaí.

A Bacia do Rio Piracicaba apresenta um desnível topográfico de cerca de 1.400 m em uma extensão da ordem de 370 km, desde suas cabeceiras na Serra da Mantiqueira, em MG, até sua foz no Rio Tietê. Na Bacia do Rio Capivari, o desnível topográfico é pequeno, não ultrapassando 250 m em um percurso de 180 km, desde as suas nascentes na Serra do Jardim. O Rio Jundiaí, com suas nascentes a 1.000 m de altitude na Serra da Pedra Vermelha (Mairiporã), apresenta desnível topográfico total em torno de 500 m, em uma extensão aproximada de 110 km (CENTRO TECNOLÓGICO DA FUNDAÇÃO PAULISTA - CETEC, 2000).

Na região das BH-PCJ é produzido cerca de um 6% do PIB de Brasil. Conta com uma população de cerca de cinco milhões de habitantes.

A FIGURA 22 mostra: i) os municípios que fazem parte das Bacias PCJ, ii) os municípios cujas áreas de drenagem encontram-se parcialmente contidas nas Bacias PCJ, e iii) os municípios limítrofes das Bacias PCJ. O divisor de água é o limite físico e político, contabilizado como área fora das Bacias PCJ.

Figura 22 – Municípios que integram as BH-PCJ
Fonte: IRRIGART (2005)

Em termos hidrográficos, as BH-PCJ possui sete sub-bacias principais, sendo cinco pertencentes ao Piracicaba (Piracicaba, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia), além do Capivari e Jundiá. As áreas de drenagem das Sub-Bacias do Piracicaba são apresentadas no QUADRO 1.

Sub-Bacias	Área – SP (km ²)	Área – MG (km ²)	Área total (km ²)	(%)	Área no Sistema Cantareira	
					km ²	(%)
Camanducaia	870,68	159,32	1.030,00	8,2	-	-
Jaguari	2.323,42	966,58	3.290,00	26,2	1.252,00	9,9
Atibaia	2.828,76	39,98	2.868,74	22,8	715,00	57
Corumbataí	1.679,19	-	1.679,19	13,4	-	-
Piracicaba	3.700,79	-	3.700,79	29,4	-	-
Total Piracicaba	11.402,84	1.165,88	12.568,72	100,0	1.967,00	15,6

Quadro 1 – Áreas das sub-bacias do Rio Piracicaba (SP e MG)
Fonte: IRRIGART (2005)

O QUADRO 2 apresenta as áreas totais das BH-PCJ.

Bacias	Área – SP (km ²)	Área – MG (km ²)	Área total (km ²)	Área total (%)
Piracicaba	11.402,84	1.165,88	12.568,72	82,1
Capivari	1.620,92	-	1.620,92	10,6
Jundiaí	1.114,03	-	1.114,03	7,3
Total PCJ	14.137,79	1.165,88	15.303,67	100,0

Quadro 2 – Áreas totais das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
Fonte: IRRIGART (2005)

No Estado de Minas Gerais, a área incorporada às BH-PCJ corresponde principalmente a uma parcela da Bacia do Rio Jaguarí, um dos formadores do Rio Piracicaba.

Atualmente 64 municípios paulistas e cinco municípios mineiros fazem parte do plenário dos Comitês PCJ (COMITÊ PCJ, 2010).

2.2.1.1 Delimitação espacial

O MOVA tem sido parametrizado na sub-bacia das Posses, pertencente ao município de Extrema, MG. Nessa sub-bacia vem sendo implementado o projeto piloto de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos, chamado de “Conservador das Águas”.

O município de Extrema está localizado no extremo sul do estado de Minas Gerais, na serra da Mantiqueira, distante 480 km da cidade de Belo Horizonte capital do estado de MG e a 100 km da cidade de São Paulo. Extrema tem limites com os municípios de Itapeva, Toledo, Pedra Bela, Camanducaia, Joanópolis e Bragança Paulista (FIGURA 23).

Figura 23 – Localização da área de estudo
Fonte: Azevedo (2008)

Extrema conta com uma população de 27.155 habitantes. 99.8% de área total do município esta inserida dentro do Sistema Cantareira.

O rio Jaguarí é o principal curso d'água do município e corta o mesmo em toda a sua extensão, sendo responsável pelo abastecimento de toda a zona urbana de Extrema. Sua nascente está localizada no município de Sapucaí Mirim, passando pelo Distrito de Monte Verde e entrando no município pelo bairro do Salto de Cima. Seus principais afluentes são o rio Camanducaia e o ribeirão do Juncal, oriundos dos municípios de Camanducaia e Itapeva e os córregos que nascem na área do município, sendo os principais o Ribeirão do Salto de Cima, Ribeirão dos Forjos, Ribeirão das Furnas, Ribeirão Tenentes, Ribeirão do Matão e o Córrego das Posses. Seus interflúvios estão localizados na Serra da Mantiqueira, inserida na Província do Planalto Atlântico (EXTREMA, 2005a). A FIGURA 24 mostra a distribuição das sub-bacias e os

rios que as compõem.

SUB BACIAS DO MUNICÍPIO DE EXTREMA

Figura 24 – Sub-bacias do município de Extrema

Fonte: Extrema (2005a)

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006; 1995; 1985; 1970 e 1959) citados em Azevedo (2008), desde sua origem o município tem sua economia baseada na agropecuária. De início e até a década de 1950, o café foi a cultura mais importante na região. Porém, a criação de gado e, conseqüentemente, a importância espacial das pastagens sempre foi dominante na paisagem. Até 1955 a divisão do uso da terra entre as culturas no Município de Extrema obedecia ao esquema tradicional das áreas cafeeiras. O café, como cultura de base econômica, ocupando as maiores extensões, seguido pelo milho para os animais e arroz e feijão para os trabalhadores. Na década de 1970, os dados já mostram o resultado do processo de decadência da cultura cafeeira e o reforço da cultura do milho.

O feijão amplia sua posição e percebe-se o início de uma pequena diversificação de culturas.

Nos anos seguintes as posições apenas se consolidam, porém, em 2006 os dados mostram uma perda sensível de área de feijão em benefício do aumento importante da área do milho. No período de 1980 e 2005, pode-se afirmar que a economia e a paisagem de Extrema são dominadas pelas atividades pecuárias (FIGURA 25).

Figura 25 – Evolução do uso da terra município de Extrema, MG de 1955 a 2006 (em % de área total do município)

Fonte: Azevedo (2008)

A oscilação da vegetação natural, nos últimos 20 anos, está relacionada ao aumento populacional expressivo do município de Extrema que apresentou um crescimento de 78,33% neste período (HOEFFEL et al., 2008). Segundo estes autores, o desenvolvimento econômico de Extrema, intensificado pela duplicação da Rodovia Fernão Dias, a proximidade com a Região Metropolitana de São Paulo e a especulação imobiliária, acentuou a expansão urbana e aumentou a pressão nos ecossistemas florestais.

O mapa climático do Brasil (FIGURA 26) mostra que na região de Extrema, MG o clima predominante é do tipo Cwb (tropical de altitude) definido como clima quente e úmido com inverno seco, com total de chuvas do mês mais úmido superior a 191 mm e do mês mais seco inferior a 30 mm, com temperatura média do mês mais quente acima de 21°C e do mês mais frio abaixo de 16°C (EXTREMA, 2005a).

Figura 26 – Mapa Climático de Brasil
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2009)

A formação geológica do município de Extrema é constituída basicamente de granitos, granitóides, migmatitos diversos, gnaisses dolomíticos, quartzíticos e metaconglomerados. As feições geomórficas da área de estudo incluem-se no relevo de degradação em planaltos dissecados, caracterizados por terrenos baixos e planos junto às margens dos rios, constituindo planícies aluviais expressivas, predominando relevos de dissecação fluvial diferencial marcado pelo aprofundamento da drenagem que, nas cabeceiras encontram-se ramificadas e no restante da bacia os rios são mais retilíneos e encaixados, com afluentes na sua maioria de primeira ordem (EXTREMA, 2005a).

O relevo em Extrema é caracterizado pela alta declividade e amplitudes acima de 300 m com topos escarpados e vertentes retilíneas. As incisões da drenagem são bem pronunciadas formando vales fechados em V. Nas encostas mais íngremes, há a predominância de cristas simétricas e assimétricas, escarpas e ravinas, com vales encaixados, alinhados ao longo das principais direções de fraturamento. As cristas possuem nítido alinhamento SW-NE, com altitudes que variam de 1.450 a 1.700 m (EXTREMA, 2005a).

A vegetação nativa pode ser observada nos topos de morros, enquanto no sopé nota-se a presença de pastagens com fragmentos de vegetação natural formando um mosaico (FIGURA 27).

Figura 27 – Configuração da paisagem, Extrema, MG
Fonte: Azevedo (2008)

2.2.1.1.1 Sub-bacia das Posses

A sub-bacia das Posses situa-se na região sul do estado de Minas Gerais, no município de Extrema ($22^{\circ}51'18''\text{S}$, $46^{\circ}19'04''\text{O}$), entre as coordenadas UTM 374.500 e 371.500 de longitude E e 7.468.200 e 7.474.800 de latitude S (Datum SAD 69), entre as altitudes de 1.144 a 1.739 m (FIGURA 28). Possui, aproximadamente, 1.201,94 hectares, é uma extensão de 7.116,19 m e 7.643,5 m de comprimento do curso de água (DA SILVA et al. 2008). Possuindo mais de 100 propriedades rurais que sustentam atividade agrícola de subsistência e a pecuária de leite sendo uma pequena fração da produção comercializada localmente. Está inserida na bacia hidrográfica do Rio Jaguarí, um dos rios formadores do Reservatório do Sistema Cantareira que abastece a cidade de São Paulo no alto Tiête.

Figura 28 – Sub-bacia das Posses, Extrema, MG, contendo sua rede de drenagem
 Fonte: Extrema (2005a)

i) Clima

O clima na sub-bacia hidrográfica é do tipo Cwb e de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves e estiagem de inverno. A temperatura média anual é em torno de 18°C, tendo no mês mais quente e no mês mais frio temperaturas médias de 25,6°C e 13,1°C, respectivamente, com ocorrência de geadas anualmente. Tem uma precipitação média anual de 1.744 mm (EXTREMA, 2005a).

ii) Relevo

Segundo De Freitas (2008), o relevo presente na área corresponde, principalmente, áreas de relevo ondulado e forte ondulado, sendo que a área plana é praticamente desprezível, conforme a TABELA 4.

Tabela 4 – Distribuição do relevo da sub-bacia das Posses

Classes	Área	
	ha	%
Plano (0-3%)	7,83	1
Suave ondulado (3-12%)	114,12	9
Ondulado (12-24%)	469,17	39
Forte ondulado (24-45%)	559,44	46
Montanhoso (45-75%)	63,54	5
Escarpado (>75%)	3,33	>1
Total	1.217,43	100

Fonte: De Freitas (2008)

A FIGURA 29 representa o mapa de declividade da sub-bacia das Posses.

Figura 29 – Mapa de declividade da sub-bacia das Posses, Extrema, MG
Fonte: Azevedo (2008)

iii) Solos

A ocupação e a colonização da região sul do estado de Minas Gerais provocaram o desmatamento quase total de sua vegetação natural, provocando maior suscetibilidade dos solos à erosão hídrica, em decorrência do manejo incorreto do solo, com ausência de práticas conservacionistas, notadamente na atividade da pecuária leiteira e de corte.

Na sub-bacia das Posses um grande volume de água deixa de infiltrar naturalmente nos solos em decorrência da redução da cobertura vegetal e do uso incorreto do solo. O déficit, aliado à ampliação das demandas de consumo de água, pode provocar um colapso no abastecimento (DE FREITAS, 2008).

Outro problema importante é que os sedimentos provenientes da erosão podem ser carregados para corpos de água superficiais, provocando o assoreamento de várzeas, rios, lagos e reservatórios. Isso diminui a disponibilidade de água para o ecossistema e para o consumo humano.

Para definir e caracterizar os tipos de solo Da Silva et al. (2008) utilizou os procedimentos normalizados por Lemos et al. (2005) e a classificação de solos da EMBRAPA (2006). Os pontos degradados pela erosão hídrica resultam do estudo de campo efetuado também por Da Silva et al. (2008).

Os solos dominantes na sub-bacia das Posses são Neossolos Litólicos e Flúvicos, Cambissolos Háplicos e Húmicos, e Argissolos Vermelho-Amarelo (FIGURA 30 e TABELA 5).

Figura 30 – Mapa de solos presentes na sub-bacia das Posses, Extrema, MG
Fonte: Azevedo (2008)

Tabela 5 – Distribuição dos solos na sub-bacia das Posses em hectares e % de área ocupada por classe

Tipo Solo	ha	%
Argissolo Vermelho Amarelo-PVA	433,48	36,07
Cambissolo (Haplico e Humico)-CX e CH	491,76	40,91
Neossolo Litólico-NL	159,88	13,30
Neossolo Flúvico-NF	116,82	9,72
Total	1.201,94	100,00

Fonte: Da Silva et al. (2008)

Associados aos Neossolos Litólicos a área possui os solos Cambissolos e Argissolos, que são solos relativamente mais profundos, a presença de pedregosidade e rochosidade dificulta o preparo do solo. A baixa infiltração de água, tendência ao encrostamento, pouca espessura do solo, presença de horizontes diagnósticos B textural e incipiente, confere a estes solos altos valores de erodibilidade, ou seja, alta susceptibilidade a erosão hídrica.

A sub-bacia das Posses, quanto à tipologia e distribuição dos processos erosivos, apresenta: erosão laminar, erosão em sulco raso e profundo, erosões ativas na rede de drenagem e erosão em túnel. O uso do solo dominante é pastagem (FIGURA 31) a qual ocupa um 76,18% da área total da sub-bacia onde muitas delas estão degradadas, tendo ademais, animais acima de sua capacidade de suporte (DA SILVA et al., 2008).

Figura 31 – Mapa de uso atual do solo na sub-bacia das Posses, Extrema, MG
Fonte: Azevedo (2008)

iv) Capacidade de uso do solo

De Freitas et al. (2008) realizou estudo de determinação da Capacidade de Uso do solo objetivando a elaboração, a execução, a interpretação de levantamentos conservacionista e a determinação das classes de capacidade de uso do solo, visando à seleção de áreas para uso agrícola, preservação permanente e a recarga de água para a sub-bacia das Posses. O Sistema de Classificação da Capacidade de Uso foi estruturado pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos.

O levantamento do meio físico levou em conta aspectos como as características e propriedades do perfil do solo (independentes de serem ou não fatores limitantes), a declividade do terreno, a erosão já sofrida pela terra, os fatores limitantes da terra, o uso atual, o estado atual de desbravamento, além de outras características gerais da propriedade.

No estudo efetuado por De Freitas et al. (2008) as terras da sub-bacia das Posses foram discriminadas nas seguintes unidades de uso: IV, VI e VIII (TABELA 6). A FIGURA 32 mostra como se distribuem essas áreas na sub-bacia das Posses.

Tabela 6 – Distribuição das áreas de capacidade de uso do solo na sub-bacia das Posses, Extrema, MG, ocupada por classe

Classe de capacidade de uso	Distribuição	
	ha	%
IV	46,62	3,81
VI	872,99	72,66
VIII	282,33	23,53
Total	1.201,94	100,00

Fonte: De Freitas et al. (2008)

Figura 32 – Mapa das classes de capacidade de uso do solo presentes na sub-bacia das Posses, Extrema, MG
 Fonte: Azevedo (2008)

Segundo De Freitas et al. (2008) a Classe IV engloba terras que possuem riscos ou limitações permanentes muito severas quando usadas para culturas anuais. Alguns solos apresentam fertilidade natural boa ou razoável, mas não são adequados para cultivos intensivos e contínuos. Usualmente, devem ser mantidas para pastagens, mas podem ser suficientemente boas para certos cultivos ocasionais (na proporção de um ano de cultivo para cada quatro a seis anos de pastagens) ou para algumas culturas anuais, porém com cuidados muito especiais.

A classe VI possui terras impróprias para culturas anuais, mas que podem ser usadas para produção de certos cultivos permanentes úteis, como pastagens, florestas artificiais e, em alguns casos, mesmo para algumas culturas permanentes protetoras do solo, como seringueira e cacau, desde que adequadamente manejadas. O uso com pastagens ou culturas permanentes protetoras deve ser feito com restrições

moderadas, com práticas especiais de conservação do solo, uma vez que, mesmo sobre este tipo de vegetação, são medianamente suscetíveis de danificação pelos fatores de depauperamento do solo.

Na classe VIII as terras são impróprias para serem utilizadas com qualquer tipo de cultivo, inclusive o de florestas comerciais ou para a produção de qualquer outra forma de vegetação permanente de valor econômico. Prestam-se apenas para proteção e abrigo da fauna e flora silvestre, para fins de recreação e turismo ou de armazenamento de água em açudes o que as faz idôneas para instalar as APPs na sub-bacia das Posses (FIGURA 33).

Figura 33 – Mapa das áreas de preservação permanente instauradas na sub-bacia das Posses, Extrema, MG
Fonte: Azevedo (2008)

v) Aptidão agrícola

Aptidão agrícola traduz a adaptabilidade das terras para um tipo específico de utilização agrícola, pressupondo-se um ou mais distintos níveis de manejo. Neste conceito pressupõe-se a necessidade de informações, as quais deverão ser utilizadas adotando-se um sistema de estratificação que permita a transmissão de conhecimento de forma sistematizada e técnica, ou seja, com o uso de um sistema de classificação.

Com essas interpretações, as terras podem ser classificadas de acordo com sua aptidão para diversas culturas, sob diferentes condições de manejo e viabilidade de melhoramento, através de novas tecnologias.

De Freitas et al. (2008) realizaram estudo de determinação da aptidão agrícola das terras, visando a seleção de áreas para uso agrícola, preservação permanente e a recarga de água para a sub-bacia das Posses, Extrema, Minas Gerais. Os critérios utilizados para interpretação da aptidão agrícola foram os preconizados por Ramalho Filho e Beek (1995).

De acordo ao estudo realizado por De Freitas et al. (2008) as terras da sub-bacia das Posses foram discriminadas nas seguintes classes de aptidão agrícola: 3(abc), 5n e 6, destinados ao uso agrícola, pastagens, preservação da biodiversidade da fauna e flora e recarga de água.

A TABELA 7 e a FIGURA 34 apresentam a distribuição das áreas ocupadas por categoria de aptidão agrícola nas Posses.

Tabela 7 – Distribuição por categorias de aptidão agrícola na sub-bacia das Posses, Extrema, MG

Aptidão agrícola das terras	Distribuição	
	ha	%
3(abc)	379,40	31,72
5n	492,08	41,14
6	324,52	27,13
Total	1.196,00	100,00

Fonte: De Freitas et al. (2008)

Figura 34 – Mapa de aptidão agrícola das terras da sub-bacia das Posses, Extrema, MG
Fonte: Azevedo (2008)

Segundo De Freitas et al. (2008) a aptidão 3(abc) engloba terras com aptidão regular para lavouras de ciclo curto e/ou longo nos níveis de manejo a, b e/ou c e representam 31,72% da área e correspondem basicamente às áreas que possuem Argissolos Vermelho-Amarelo, sendo o grau de erosão o maior fator limitante para os agricultores nestas áreas.

As terras classificadas na aptidão 5n representam 41,14% da área da sub-bacia e são uma classe de aptidão regular para pastagem natural e inaptas para silvicultura. Estas áreas encontram-se sobre Cambissolo Háplico e o principal fator limitante nestas áreas é a deficiência do solo relacionada à fertilidade e profundidade efetiva.

As classes classificadas no subgrupo seis são terras sem aptidão para uso agrícola e representam 27,13% da área total e estas áreas são áreas onde existe a presença de Neossolos Litólicos e Flúvicos. Os principais fatores limitantes para estas áreas são alta declividade, alto risco de erosão e profundidade efetiva para os

Neossolos Litólicos. No caso específico do Neossolo Flúvico a limitação se deve a deficiência por oxigênio em determinadas épocas do ano.

vi) Vegetação

A vegetação nativa da sub-bacia do Ribeirão das Posses encontra-se bastante fragmentada devido à intensidade de ocupação sofrida ao longo de pelo menos dois séculos. Sendo sua fisionomia caracterizada por mosaicos, variando de áreas mais densas a áreas mais abertas.

Segundo Azevedo e Manzatto (2005), de modo geral, na sub-bacia das Posses, além das alterações de origem antrópica, que provocam diferenças vegetacionais, existem aquelas naturais devido às diferenças de solo, de umidade e de altitude. Destacando-se, ainda, que a região está situada na interface entre duas fisionomias de vegetação distintas, de ampla distribuição no Brasil – a Mata Atlântica e as Florestas Semidecíduas (LEITÃO-FILHO, 1986; 1982), ou, de acordo com a nomenclatura adotada pelo IBGE (1993), entre as formações da Floresta Ombrófila Densa e Mesófila Semidecídua e Mesófila Semidecídua de Altitude que, dependendo das condições edáficas e climáticas, muitas vezes relacionadas a gradientes topográficos e ao relevo, predomina uma ou outra tipologia vegetal ou, em alguns casos, misturam-se aspectos de mais de um tipo.

Sob esta perspectiva, as espécies de ampla distribuição nos remanescentes presentes na bacia das Posses são as mais representativas devido a sua tolerância e adaptação a uma amplitude topográfica diversificada. Dentre as espécies que se enquadram nestas características podem ser destacadas: o Tamanqueiro (*Alchornea triplinervia* e *Alchornea glandulosa*), o Capixingui (*Croton floribundus*), o Cedro (*Cedrela fissilis*), o Rabo-de-Macaco (*Lonchocarpus campestris*), o Açoita-Cavalo (*Luehea grandiflora*), o Jacarandá-do-Mato (*Machaerium villosum*), a Canelinha (*Nectandra lanceolata*), e a Azeitona-do-Mato (*Rapanea umbellata*).

Na sub-bacia do ribeirão das Posses, a área de nascente é caracterizada pela vegetação já bastante perturbada, de porte que varia entre 10 m e 15 m, o estrato arbóreo é pouco denso sendo que a espécie que apresentou a maior densidade é a

aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius*), seguida da capororoca (*Myrsine ferruginea* e *M. umbellata*) (EXTREMA, 2005a).

A área mediana é caracterizada por árvores de porte entre 15 m e 20 m, sendo o estrato arbóreo bastante denso, e as espécies que apresentaram maior densidade em ordem decrescente foram o açoita-cavalo (*Luehea grandiflora*), seguida da ainhuva (*Nectandra lanceolata*) e do bico de pato (*Machaerium aculeatum*).

A área de foz é caracterizada por árvores de porte entre 10 m e 15 m. O estrato arbóreo é pouco denso, sendo as espécies que apresentaram maior densidade a embira de sapo (*Lonchocarpus campestris*) seguida do angico (*Anadenanthera colubrina*) e da *Eugenia verrugosa* (EXTREMA 2005a).

O QUADRO 3 apresenta a listagem completa e a densidade das espécies encontradas na sub-bacia das Posses.

Região de Nascente	Dens.	Região Mediana	Dens.	Região de Foz	Dens.
<i>Schinus terebinthifolius</i>	15	<i>Luehea grandiflora</i>	13	<i>Lonchocarpus campestris</i>	11
<i>Myrsine ferruginea</i>	10	<i>Nectandra lanceolata</i>	9	<i>Anadenanthera colubrina</i>	7
<i>Myrsine umbellata</i>	6	<i>Machaerium aculeatum</i>	7	<i>Eugenia verrugosa</i>	6
<i>Bauhinia forficata</i>	5	<i>Cabralea canjerana</i>	5	<i>Sebastiania commersoniana</i>	5
<i>Machaerium aculeatum</i>	5	<i>Dalbergia frutescens</i>	4	<i>Myrciaria tenella</i>	5
<i>Eupatorium aff. verbenaceum</i>	4	<i>Bauhinia forficata</i>	4	<i>Protium heptaphyllum</i>	5
<i>Machaerium villosum</i>	4	<i>Anadenanthera colubrina</i>	3	<i>Sapium glandulatum</i>	5
<i>Ocotea puberula</i>	4	<i>Cedrela fissilis</i>	3	<i>Gochnatia polymorpha</i>	4
<i>Rollinia silvatica</i>	3	<i>Machaerium stipitatum</i>	3	<i>Cordia sellowiana</i>	2
<i>Croton floribundus</i>	2	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	3	<i>Alchornea glandulosa</i>	2
<i>Inga marginata</i>	2	<i>Rollinia silvatica</i>	2	<i>Ficus guarantica</i>	2
<i>Aspidosperma parvifolium</i>	2	<i>Casearia sylvestris</i>	2	<i>Micranda elata</i>	2
<i>Machaerium stipitatum</i>	2	<i>Maytenus ilicifolia</i>	2	<i>Erythroxylum deciduum</i>	2
<i>Roupala brasiliensis</i>	2	<i>Ocotea puberula</i>	2	<i>Lithraea molleoides</i>	2
<i>Aloysia virgata</i>	2	<i>Myrcia guianensis</i>	2	<i>Lamanonia cuneata</i>	2
<i>Lonchocarpus campestris</i>	2	<i>Guettarda uruguensis</i>	1	<i>Nectandra lanceolata</i>	2
<i>Gochnatia polymorpha</i>	1	<i>Myrsine umbellata</i>	1	<i>Inga uruguensis</i>	2
<i>Cedrela fissilis</i>	1	<i>Maclura tinctoria</i>	1	<i>Astronium graveolens</i>	1
<i>Alchornea triplinervia</i>	1	<i>Micranda elata</i>	1	<i>Pithecolobium incuriale</i>	1
<i>Sapium glandulatum</i>	1	<i>Alchornea glandulosa</i>	1	<i>Cabralea canjerana</i>	1
<i>Cordia trichotoma</i>	1	<i>Campomanesia guazumaefolia</i>	1	<i>Soracea bonplandii</i>	1
<i>Lithraea molleoides</i>	1	<i>Vochysia tucanorum</i>	1	<i>Copaifera langsdorffii</i>	1
<i>Prunus myrtilifolia</i>	1	<i>Lonchocarpus guilleminianus</i>	1	<i>Casearia sylvestris</i>	1
<i>Alchornea sidifolia</i>	1	<i>Austroplenckia populnea</i>	1	<i>Campomanesia guazumaefolia</i>	1
<i>Psidium guajava</i>	1	<i>Rollinia salicifolia</i>	1	<i>Eugenia involucrata</i>	1
<i>Siparuna aff. cujabana</i>	1	<i>Machaerium villosum</i>	1	<i>Erythrina falcata</i>	1
		<i>Cariniana estrellensis</i>	1	<i>Guettarda uruguensis</i>	1
		<i>Inga uruguensis</i>	1	<i>Luehea grandiflora</i>	1
		<i>Soracea bonplandii</i>	1	<i>Myrsine umbellata</i>	1
		<i>Connarus cf. regnelli</i>	1	<i>Machaerium aculeatum</i>	1
		<i>Citronella aff. megaphylla</i>	1		

Quadro 3 – Espécies amostradas nos fragmentos da sub-bacia do Ribeirão das Posses
Fonte: Extrema (2005a)

2.2.2 Fonte de dados

Os dados e informações necessárias para a construção e aplicação do modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos – MOVA, aplicado nas BH-PCJ, são de natureza secundária. Os dados são provenientes de diversas fontes tais como: Agência Nacional das Águas (ANA); Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); Instituto Agrônomo de Campinas (IAC); Plano de Recursos Hídricos das BH-PCJ 2008-2012; Companhia de Abastecimento de Água e Saneamento do Estado de São Paulo (SABESP); Departamento Nacional de Meteorologia (DNM); Prefeitura de Extrema, MG; Comitê das Bacias PCJ; Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH); Sistema Integrado de Gestão Ambiental da Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIGAM) e da literatura científica especializada.

2.2.3 Desenvolvimento do MOVA

O processo de estruturar e construir modelos é eminentemente criativo. Sem dúvida é um trabalho de criação, de abstração que inclui uma pesquisa ampla e multidisciplinar. A modelagem não é feita somente através de uma guia ou seguindo certos princípios e procedimentos. É um processo permanente de aprendizado e análises, no qual cada pesquisador cria o modelo mais adequado para alcançar seus objetivos (STELLA, 2001).

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo de simulação para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, baseado na Dinâmica de Sistemas, com o auxílio do software STELLA 9.1.3. Seu objetivo principal é o de medir fluxos físicos de três serviços ecossistêmicos relacionados à quantidade de água: Serviço de Água em Superfície, Serviço de Água Infiltrada e Serviço de Água Armazenada.

Assim como determinar as variáveis biofísicas que tem maior impacto para a provisão destes serviços e sua relação com o tipo de cobertura vegetal, pois parte-se do pressuposto que o reflorestamento favorece a geração destes serviços.

Dessa forma, o modelo resulta ser um instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento do projeto piloto de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos “Conservador das Águas” implementado no local de estudo. Entretanto, sua construção foi elaborada sobre uma ampla investigação, além de um trabalho criativo, que tem sido estruturado através das seguintes etapas: i) conceitualização; ii) formalização; e iii) simulação - esta etapa inclui a avaliação e exploração. As duas primeiras etapas apresentam-se a seguir dentro da metodologia a última será apresentada no apartado de resultados e discussão.

2.2.3.1 Etapa de conceitualização

Essa etapa consistiu-se na familiarização com o objeto de estudo modelado. Se tratando, no caso dos processos do ciclo hidrológico, que geram serviços ecossistêmicos hídricos, visando sua definição através da identificação destes processos e de seus elementos constitutivos, uma vez definidos ditos processos se procede-se à formulação do diagrama de influência que representa esse sistema.

2.2.3.1.1 Definição do modelo de retenção, filtragem e armazenamento de água

De Groot et al. (2002) supõem que a valoração ecológica dos serviços ambientais hídricos deve partir da premissa que a conservação das florestas e das matas nativas, assim como o reflorestamento, favorecem os processos de retenção, infiltração e armazenagem da água, o que incrementa a oferta de bens e serviços relacionados. Existe consenso de que esses processos dependem de fatores que variam espacial e temporalmente como: a declividade do lugar, as características e composição do solo, as espécies de árvores, os tipos de vegetação, o clima e os tipos de manejo, entre outros.

Sob esses aspectos, torna-se muito difícil fazer predições sobre a quantidade de água que é retida, filtrada, ou armazenada. No entanto, podem-se simular esses processos e o efeito desses fatores com base em modelos teóricos, e métodos de avaliação de consenso podem ser de utilidade em várias direções: em primeiro lugar,

permitem explicar com base no conhecimento atual como operam os processos de retenção, infiltrado, e armazenagem de água.

A simulação possibilita a formulação de hipóteses sobre o efeito relativo que tem cada uma das variáveis incluídas no modelo (componentes biofísicos) nos processos que geram os SEH. Ao conhecer esse efeito, é possível avaliar a importância das medidas de conservação consideradas dentro das políticas de um Programa de Pagamentos por Serviços Ecosistêmicos Hídricos, que estão comprometidos a seguir os donos das áreas beneficiadas. Também é possível hierarquizar o tipo de informação que é importante recopilar ou gerar no caso de querer fazer projeções mais confiáveis com o modelo. Por outro lado, a calibração e validação adequada dos modelos referidos, podem inclusive gerar projeções do estado futuro desses serviços ecossistêmicos.

O modelo foi desenvolvido com o uso do software STELLA versão 9.1.3 para Windows (STELLA, 2001) e realizado a partir de uma modificação ao construído por Voinov et al. (2004). Foi preciso modificá-lo a fim de adaptá-lo às condições particulares da região em estudo. Encontra-se baseado no modelo conceitual que se apresenta na FIGURA 35.

Figura 35 – Diagrama Conceitual dos Processos Hidrológicos
Fonte: adaptado de Voinov et al. (2004)

O modelo parte do suposto que a água, num território dado, flui seguindo o percurso apresentado na FIGURA 36.

Figura 36 – Percurso da água num território
Fonte: adaptado de Novotny e Olem (1994)

Por intermédio de uma análise sistêmica, foram determinadas as principais variáveis físicas e biológicas e suas respectivas inter-relações, conformando-se assim, a estrutura do modelo de simulação.

Esta estrutura é representada no diagrama causal, que tem sido utilizado como base para a elaboração do diagrama de estoques e fluxos, por meio do qual se determinou o modelo matemático que permitiu efetivar a simulação numérica. No decorrer da pesquisa, foram aplicados testes de validação do modelo, que permitirão constatar a estruturação e coerência aos dados reais, tornando-o adequado à área de estudo.

2.2.3.1.2 Diagrama de influência ou círculo de causalidade

O círculo de causalidade é uma das ferramentas do pensamento sistêmico por meio do qual é possível expressar graficamente o comportamento, ao longo do tempo, das diversas variáveis envolvidas em uma dada questão. É composto por variáveis conectadas por meio de setas que indicam o sentido da alimentação do ciclo ou da influência das variáveis. Os sinais “+” e “-” indicam respectivamente se o movimento de alimentação está no mesmo sentido da influência original ou se está em sentido oposto. A letra “B” indica se está ocorrendo um processo de balanceamento (ou contrapeso), a letra “R” indica se está ocorrendo reforço (NARDELLI; GRIFFITH, 2000), FIGURA 37.

Figura 37 – Diagrama de Influência do MOVA

O círculo de causalidade ou diagrama de influência, elaborado para o sistema hidrológico permite a visualização do conjunto de inter-relações existentes entre todos os aspectos ambientais e antrópicos a ele relacionados.

Na FIGURA 37 estão identificados os componentes básicos do sistema, bem como a interação que se dá entre eles, sendo esta última a que proporciona as características estruturais do sistema objeto de estudo.

Apresenta-se “Água Superficial”, “Água Zona não Saturada” e “Água Zona Saturada” como os estoques ou reservatórios que recebem a água que é movimentada dentro do ciclo hidrológico. Os processos como “Precipitação”, “Infiltração”, “Percolação”, “Transpiração” e “Evaporação” são os que geram os intercâmbios de fluxos físicos de água entre a Biosfera, a Atmosfera a Litosfera e a Hidrosfera. Foram vinculados esses processos à política de reflorestamento implementada no local de estudo através de um Projeto Piloto de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos Hídricos, que por meio de incentivos econômicos está conservando e aumentando as áreas florestadas, protegendo as nascentes, prevenindo e reduzindo a erosão e construindo bacias de captação no local de estudo.

Com respeito aos laços de retroalimentação existentes entre os componentes do sistema, podem-se destacar os seguintes pontos: o aumento no reflorestamento gera um impacto positivo sobre o processo de infiltração incrementando esse processo; manifestando-se os efeitos de uma variável sobre outra com um sinal (+) ao final da

seta, que indica que a influencia de uma variável sobre outra faz que os efeitos gerados caminhem na mesma direção (FIGURA 37).

Por exemplo, se a atividade de reflorestamento aumenta, ela repercute em um aumento do processo de infiltração e vice-versa. Ao contrário, um aumento do reflorestamento gera um impacto negativo sobre a evaporação, pode-se então afirmar que os efeitos caminham em direções contrárias, representadas com um sinal (-) ao final da seta. Da mesma forma pode-se também observar que, um aumento na Precipitação gera um aumento no estoque de Água Superficial (+) e vice-versa. O aumento no estoque de Água Superficial incrementa por sua vez o processo de Infiltração (+) o que também aumenta o estoque de Água da Zona não Saturada (+).

O aumento da quantidade de Água na Zona não Saturada incrementa a quantidade de água Percolada (+), que também impacta de forma positiva no estoque de Água na Zona Saturada (+) ocasionando um aumento do processo de Transpiração (+).

O processo de Transpiração guarda uma relação no mesmo sentido com respeito ao estoque de Água na Zona não Saturada e com respeito ao processo de Evaporação, já que existe um efeito positivo derivado da relação entre essas variáveis – se uma cresce, a outra também, e vice-versa. No referente ao processo de Evaporação observamos que geram-se efeitos em sentido contrário da variação no que se refere ao estoque de Água na Zona não Saturada e ao Reflorestamento (Matas e Florestas), por isso o sinal (-) na relação entre essas variáveis.

Produto dos efeitos das relações entre as variáveis, o modelo está caracterizado, em síntese, por um laço de realimentação positivo ou de reforço (R). Isto significa que, a variação de um elemento se propaga em toda a sua extensão reforçando a variação inicial, gerando um crescimento exponencial do sistema a partir de onde toda a variação é amplificada provocando mais movimento na mesma direção.

2.2.3.2 Etapa de formalização

A partir da construção do círculo de causalidade específico dos processos ecológicos, que geram os serviços ecossistêmicos hídricos nas BH-PCJ, foi elaborado o

modelo de simulação para a valoração ecológica de três serviços: Serviço de Água em Superfície, Serviço de Água Infiltrada e Serviço de Água Armazenada.

Nesta etapa efetuou-se a formalização do diagrama de influência (FIGURA 37) empregando para isto uma linguagem matemática. O ponto de partida foi a elaboração do diagrama de estoque e fluxo, em base ao qual se escreveram as equações do modelo.

2.2.3.2.1 Diagrama de estoque e fluxo

O diagrama de influencia do modelo (FIGURA 37) permite desenhar o diagrama de estoque e fluxo, que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema representado (FIGURA 38).

Figura 38 – Diagrama de estoque e fluxos
Fonte: Adaptado de Voinov et al. (2004)

A conversão se deu da seguinte forma: uma vez representados no diagrama de influência, os componentes principais do MOVA (Matas e Florestas-reflorestamento-, Água Superficial, Água Zona não Saturada, Água Zona Saturada, Precipitação, Infiltração, Percolação, Transpiração e Evaporação), assim como as relações principais existentes entre eles, procedeu-se a sua formalização em linguagem de Dinâmica de Sistemas, auxiliados pelas ferramentas empregadas na construção de modelos que se elaboram a base deste enfoque. As estruturas básicas para o desenho do diagrama são os estoques e os fluxos.

O Programa STELLA 9.1.3 para Windows, permite a construção e simulação de modelos dinâmicos em nível quantitativo com uma representação gráfica baseada em ícones. Fundamentado na metáfora do tanque e da torneira, o ambiente STELLA (STELLA, 2001) possibilita a construção de modelos por meio da conexão dos elementos básicos no formato de ícones: estoque, fluxo (taxa), conversor e conectores. Neste nível os ícones do Bloco de Construção do Modelo representam os ícones básicos assim descritos:

ESTOQUE: Representa uma variável que pode ser alterada ao longo do tempo por uma variável do tipo taxa. Esta variável reflete o estado de um sistema.

FLUXO: Representa uma variável que promoverá a mudança da variável tipo nível ao longo do tempo. Pode ser unidirecional ou bidirecional.

VARIÁVEL AUXILIAR: Representa uma constante ou uma função, sendo nos dois casos para converter valores. Elas não acumulam fluxos e, portanto, não possuem “memória” do sistema.

CONECTOR - Serve para transportar a informação de uma variável para a outra. Quando se usa um conector para ligar duas variáveis, está-se impondo uma relação entre elas.

Os estoques representam no modelo as disponibilidades de recursos. Representam as condições e informam como está a situação; e suas variáveis que acumulam trocas influenciadas pelos fluxos. Neste caso, os estoques do MOVA são: “água superficial”, “água zona não saturada” e “água na zona saturada” que representam as quantidades físicas dos três serviços ecossistêmicos hídricos avaliados:

serviço de água em superfície, de água infiltrada é de água armazenada respectivamente.

Os fluxos se representam com válvulas – identificam as ações que acumulam e, ou, esvaziam os estoques, e dizem como os fatos estão se desenrolando – são variáveis dependentes do tempo.

O modelo tem fluxos nomeados com taxas que são controladas pela (s) taxa (s) da (s) variável (is) em conexão, que usualmente é uma variável auxiliar ou uma constante, e que estão alimentando a oferta hídrica. Estes fluxos são: precipitação, infiltração, percolação, transpiração e evaporação.

Os outros elementos do modelo não evidenciados no diagrama de influência ou círculo de causalidade, e que determinam os fluxos, se convertem em variáveis auxiliares ou constantes, tal como a interceptação, o índice de área foliar, o tipo de habitat, a textura do solo, entre outros. As relações entre as variáveis, que no diagrama de influência estabelecem-se por intermédio de setas, neste diagrama se indicam da mesma forma, sendo chamados de conectores. Estes conectores vinculam os estoques e as variáveis auxiliares ou as constantes; os estoques aos reguladores de fluxos; e as auxiliares ou as constantes a outras auxiliares ou constantes.

O ANEXO A contem a descrição dos parâmetros principais que compreende o MOVA apresentado na FIGURA 39.

O MOVA simula os processos ecossistêmicos que tem a ver com a geração de fluxos de SEH relacionados à quantidade de água. Todos esses processos estão compreendidos dentro do ciclo hidrológico que numa bacia hidrográfica envolve os seguintes processos: precipitação e interceptação, evaporação; infiltração; evapotranspiração, percolação e armazenagem. Os diagramas de estoque e fluxo construídos no software STELLA que representam ditos processos podem ver-se no ANEXO B.

Figura 39 – Modelo de simulação construído no Software STELLA

2.2.3.2.2 Descrição matemática do modelo

Os modelos de DS são construídos usando um conjunto de equações diferenciais, as quais são matematicamente resolvidas, para um determinado período, por um algoritmo que gera comportamentos dependentes do tempo, para as variáveis contidas no modelo.

A seguir são apresentadas as principais equações existentes no modelo tomadas dos trabalhos desenvolvidos por Fitz et al. (1996) e Voinov et al. (2004). Todas as fórmulas estão inseridas no programa e anexadas no código do modelo (ANEXO C).

i) Estrutura

De uma maneira conceitual o modelo que representa os processos hidrológicos pode ser representado conforme a FIGURA 40.

Figura 40 – Modelo conceitual do setor hidrológico
Fonte: Voinov et al. (2004)

O diagrama da FIGURA 40 representa de uma forma simples, os complexos processos que ocorrem no ciclo hidrológico. É composto por quatro níveis, ou estoques, mais importantes: Água superficial; Água em forma de neve/gelo; Água na zona não saturada; Água na zona saturada.

Em cada um destes estoques, uma parte da água é utilizada em processos físicos (evaporação e fluxos) e biológicos (transpiração). Na vertical, o processo é controlado pelo estoques citados anteriormente. À priori, as variáveis que afetam esses estoques são: precipitação, temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, tipo de hábitat, tipo de solo, inclinação do terreno, profundidade das raízes e índice de área foliar.

Apesar disso, seria possível modificar o modelo em função dos interesses e da disponibilidade de dados. O modelo simula o processo “terrestre” do ciclo hidrológico e não inclui o caminho da água em canais, ribeirões e rios.

ii) Escalas

ii.1) Escala temporal

A unidade de referencia temporal do modelo é de um dia. Com essa resolução temporal não é possível reproduzir o comportamento de eventos de curta duração, como a dinâmica da frente de molhamento ou quando a água da chuva infiltra no solo e caminha através da camada não saturada em direção a camada saturada de água subterrânea. Durante uma precipitação rápida, a água na superfície pode se acumular em poças e serrapilheira, porém na escala de uma bacia hidrográfica, no período de um dia, a maior parte da água precipitada infiltrará, será evaporada ou será removida pelo escoamento superficial.

A intensidade das precipitações pode influenciar seriamente na geração do escoamento, mas, geralmente, não existem dados climáticos para escalas menores que um dia.

O conceito do modelo é o seguinte: assume-se que a precipitação infiltra imediatamente em direção a camada não saturada do solo e somente irá acumular na superfície se a camada não saturada do solo for completamente saturada, ou se for excedida a taxa de infiltração diária.

O gelo e a neve podem acumular-se na superfície e isso ocorre quando as temperaturas são inferiores a zero graus centígrados. Na área estudada as temperaturas não alcançam estes valores e, portanto, o referido estoque não acumulará água nesta forma.

No modelo, a água superficial é a água dos rios, ribeirões, reservatórios e etc., movendo-se via escoamento ou evaporação.

No intervalo de um dia, o fluxo de água na superfície, considerado apenas o fluxo subterrâneo aparente, que conduz rapidamente a água distribuída na paisagem, em direção aos micro-canais e, eventualmente, ao rio. Portanto, o transporte de água na superfície inclui o fluxo aparente de água que pode ocorrer durante a chuva, permitindo considerar as diferentes capacidades de transporte de nutrientes entre fluxos sub-superficiais aparentes e profundos. Conceitualmente, isso é similar à separação do fluxo rápido e lento (POST; JAKEMAN, 1996; JAKEMAN; HOMBERGER, 1993) assumida em modelos empíricos de escoamento. Neste caso, a água na superfície disponível refere-se ao escoamento rápido, enquanto que o armazenamento da zona saturada representa o escoamento lento, definindo a taxa base de fluxo entre eventos de precipitação.

ii.2) Escala espacial

O tamanho mínimo da célula de simulação é de 200mx200m (40.000 m²), considera-se que áreas deste tamanho podem ser bastante homogêneas e com características geomorfológicas similares. Esse tamanho de célula é a área mínima que o modelo trabalha.

iii) Setor hidrológico

A seguir são analisados com maior detalhe os principais processos hidrológicos compreendidos pelo modelo, conforme o modelo hidrológico proposto por Fitz et al. (1996) e modificado por Voinov et al. (2004).

A água é retida nos três estoques ou variáveis de estado: a) Água Superficial que é a água armazenada na camada superior da superfície do solo; b) Água Zona não Saturada que é armazenada nos espaços porosos do complexo solo, porém não chega

a saturar esta camada; c) Água na Zona Saturada que é a água que se encontra saturando os espaços porosos do complexo solo.

A simulação dos fluxos entre as variáveis de estado (FIGURA 40) permite destacar os ambientes úmidos, molhados e secos através da simulação do movimento da água entre os armazenamentos e calcular a movimentação do nível de água acima e abaixo do nível do solo. O fluxo entre as variáveis de vários processos podem ser do tipo: fluxo horizontal na superfície e na zona saturada, evaporação, infiltração e percolação, e o fluxo ascendente na zona saturada e não saturada, transpiração da água etc. Estes são alguns dos fluxos mais críticos para uma simulação precisa do armazenamento da água na escala de tempo diária.

Conforme mencionado anteriormente, o modelo ignora detalhes dos processos que ocorrem em intervalos de tempos superiores ou inferiores a um dia, tal qual o movimento vertical da frente de molhamento nos eventos de infiltração. Os resultados de longa duração do armazenamento em áreas pequenas podem ser efetivamente capturados dentro da escala temporal diária ou semanal.

iii.1) Água superficial

Primeiramente calcula-se o volume de água superficial que se converte em escoamento superficial de uma determinada célula, para um dado intervalo de tempo. Já o escoamento é calculado utilizando a equação de Manning (CHOW, 1964) para fluxos superficiais, a qual é baseada nas diferenças entre as cargas hidráulicas, entre a célula atual e as células externas. Para simplificar, é proposto somente um caminho do fluxo da rede para o ambiente externo.

No contexto da modelagem espacial, as equações de fluxo deverão operar nas quatro direções. O fluxo associado a cada célula atual é:

$$sf_wt\ flow = \sqrt{\frac{Sf_wt\ head - Sf_wt\ headExt}{cell\ width}} \cdot \frac{Sf_wt\ avg^{5/3} \cdot cell\ width}{Mannings\ coef} \quad (5)$$

Em que:

Sf_wt_flow – Fluxo líquido de água (m³ d⁻¹) que entra ou sai da célula;

Sf wt headExt, Sf_wt head, e Sf wt avg - Carga hidráulica (m) da célula externa, da célula atual, e da média destas, respectivamente;

cell_width – Largura (m) da célula quadrada que está uniformemente coberta com água; e

Mannings_coef – Coeficiente de rugosidade da superfície de Manning.

Este coeficiente é função do tipo de sedimentação e da interação da altura/densidade da vegetação e da lâmina de água, e é dado por:

$$Mannings\ coef = \left| (Mac\ max\ rough - sed\ Material) \cdot \left(2 \left(1 - \frac{Sf\ wt\ depth}{Mac\ height} \right) - 1 \right) \right| + (Mac\ max\ rough) \quad (6)$$

Em que:

sed_Material – É a rugosidade mínima para a célula livre de vegetação;

Mac_max_rough – É a rugosidade máxima associada com a densidade (dinâmica) da vegetação na célula; e

mac_height – É a (altura) dinâmica das macrófitas da célula.

O comportamento da função (FIGURA 41) apresenta um coeficiente de rugosidade positivo, dando um desvio de valores para um mínimo de vegetação livre até um máximo alcançado quando as plantas estão totalmente submergidas (PETRYK et al., 1975).

À medida que a profundidade da água aumenta para valores maiores que a altura das macrófitas, a rugosidade diminui até uma assíntota na linha base da rugosidade dos sedimentos (NALLURI; JUDY, 1989).

Figura 41 – Relação entre o coeficiente de rugosidade de Manning, profundidade da água e altura da vegetação.

Fonte: Fitz et al. (1996)

As perdas de água superficial por armazenamento no solo são determinadas após se dar escoamento que pode ocorrer pelos seguintes caminhos:

- a) infiltração da água superficial até uma zona úmida do solo não saturado, baseado em medidas de taxas de infiltração para diferentes tipos de solo; e
- b) a água superficial flui em direção ao armazenamento saturado de água a uma taxa que depende das perdas de água na zona do armazenamento saturado (FIGURA 42).

Figura 42 – Fluxos de água superficial

Fonte: Voinov et al. (2004)

A água superficial que resta fica, disponível para evaporar. A evaporação da água superficial é simulada separadamente das perdas de água devido à transpiração das plantas. A evaporação potencial (m dia^{-1}) é calculada utilizando o método de Christiansen (1968). O modelo usa a temperatura média do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, como variáveis independentes de tal forma que:

$$evap\ pot = 0.0000482 \cdot C_T \cdot C_W \cdot C_H \cdot SolRadGrd/585 \quad (7)$$

Onde,

$$C_T = 0.463 + 0.425 (T/T_0) + 0.112 (T/T_0)^2$$

$$C_W = 0.672 + 0.406(W/W_0) - 0.078(W/W_0)^2$$

$$C_H = 1.305 + 0.240 (H/H_0) - 0.275 (H/H_0)^3$$

Em que:

585 cal g^{-1} – É o calor latente do vapor d'água, para transformar, radiação solar de $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ao seu equivalente em lâmina de cm d^{-1} , e

C_T , C_W , e C_H – São os coeficientes relacionados com a temperatura do ar (T em $^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (W em km h^{-1}), e umidade relativa do ar (H , proporção entre 0-1), respectivamente.

Parâmetros com o sub-índice zero, são valores de referência no método de Christiansen (1968).

iii.2) Água zona saturada e zona não saturada

Os fluxos verticais de água ocorrem entre os três compartimentos onde ela é armazenada. Se a água superficial proveniente da precipitação está presente e existe um volume disponível na camada não saturada de armazenamento no meio poroso (FIGURA 49), então a água infiltra na zona não saturada a uma taxa determinada pela taxa de infiltração (m d^{-1}) e pelo tipo de hábitat multiplicado pelo tamanho de cada célula (m^2). A capacidade disponível da zona saturada é calculada utilizando a porosidade e o volume atual de água no armazenamento não saturado. Estes

determinam também a parte úmida no armazenamento não saturado, (unsat_moist_prp).

Assume-se que a água na zona de armazenamento não saturado (FIGURA 43) é distribuída homogeneamente dentro dessa zona. Para isso, ignora-se a presença de qualquer frente de umedecimento e das heterogeneidades associadas aos processos que estão ocorrendo em escalas de tempo menores que o intervalo de tempo de um dia utilizado no modelo.

Figura 43 – Água na zona não saturada
Fonte: Voinov et al. (2004)

Quando o meio poroso está completamente saturado, a água superficial pode fluir dentro da camada saturada para preencher o fluxo que saiu desta camada, a uma taxa determinada pela perda de água. Assume-se que a taxa de movimento vertical de água, desde a superfície até a zona saturada, é no mínimo tão rápida quanto às perdas no armazenamento saturado via fluxo horizontal, transpiração e recarga profunda do aquífero. Da mesma forma, a água da zona de armazenamento saturada flui em direção ao armazenamento de água superficial quando a capacidade total do meio poroso é excedida. Isso se deve ao fato de que a zona não saturada varia em profundidade. O modelo tem uma função para determinar o grau relativo no qual a água superficial flui em direção as zonas de armazenamento saturada e não saturada na transição, desde

profundidades significativas de água encharcada, até pequenas lâminas de água e com incrementos em profundidade de armazenamento não saturado:

$$sat\ us\ unsat = \frac{1}{exp} (100 * \max((Sf\ wt\ depth - unsat\ depth), 0)) \quad (8)$$

Esta equação permite a presença de uma pequena lâmina de água que desaparece (*unsat_depth*) com a presença de uma pequena lâmina de água superficial sobreposta (*sf_wt_depth*). A função *Max (x,y)* retorna o maior argumento entre x ou y, e *exp(x)* retorna a base e elevada a potência x. A equação retorna um valor adimensional próximo de zero para uma pequena zona não saturada, resultando em maior fluxo de água na zona saturada; por outro lado, o resultado da função se aproxima de um à medida que a profundidade não saturada ganha mais importância, resultando que toda a água superficial infiltra em direção a camada não saturada.

Qualquer umidade que exceda a capacidade de campo poderá percolar da camada de armazenamento não saturada para a saturada, determinado pela condutividade hidráulica do sedimento devido às condições de não saturação. A condutividade hidráulica não saturada ($m\ d^{-1}$) decresce, para cada tipo de solo (meio poroso), desde a condutividade hidráulica saturada em função da umidade decrescente do sedimento (*unsat_moist_prp*). Este multiplicador (0 – 1) varia com o tipo de solo (DOMINICO; SCHWARTZ, 1990).

Portanto, a percolação é simplesmente a condutividade hidráulica calculada, multiplicada pelo tamanho de cada célula (m^2). Quando o nível de água subterrânea se eleva (devido à entrada de água subterrânea ou percolação), o volume de água retida no espaço poroso na zona previamente saturada, é incorporado em favor do armazenamento saturado de água. Assim, o fluxo total de água desde a zona não saturada até a zona saturada ($m^3\ d^{-1}$), é o resultado da soma da percolação e daquele fluxo proveniente das águas subterrâneas (FIGURA 44).

Figura 44 – Água na zona saturada.
Fonte: Voinov et al. (2004)

As perdas de água por transpiração da planta ocorrem tanto em condições saturadas como não saturadas, dependendo da presença/ausência de raízes em determinada zona. O modelo proposto tem uma distinção entre os controles físicos e biológicos neste fluxo, ditados pelo tipo de vegetação, disponibilidade de água e escala do modelo. Assim, existem dois tipos básicos de mecanismos de perdas por evaporação através da parte aérea da planta. O primeiro tipo refere-se ao relacionamento entre as massas de ar nas partes com folhas e ramos, além das influências atmosféricas baixas, define os fenômenos físicos Eq.(7) que influenciam as perdas por transpiração. O segundo tipo refere-se ao grau ao qual a água é limitada e, portanto, causa estresse nas plantas, simulando a redução da transpiração (logo, em certo ponto a redução da produção também) isso ocorre pelo fechamento estomático e a mudança na condutância da parte aérea da vegetação.

Em um sentido mais amplo, a transpiração é controlada pela condutância da parte aérea da vegetação, radiação líquida, déficit de saturação do ar, temperatura e velocidade do vento. O algoritmo utilizado no modelo depende de vários fatores relacionados ao formato da planta e ao meio ambiente físico. A transpiração total é determinada ao longo de um contínuo de importância relativa entre os fatores físicos versus os fatores relacionados com a planta para um determinado ecossistema. Primeiro, é calculada a parte do potencial transpiratório que se baseia na condutância

da parte aérea da planta vinculada as folhas, o déficit de saturação no ambiente (parte aérea da planta) e/ou o estresse hídrico da planta.

A seguir, o modelo de evaporação potencial Eq. (7) é utilizado para determinar a taxa potencial de fluxo evaporativo; dado pela radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Para o modelo, o grau no qual estes processos controlam o fluxo transpiratório total depende da extensão do déficit de saturação na superfície da vegetação, o qual ocorre imediatamente acima da camada limite da vegetação (JARVIS; McNAUGHTON, 1986). Considera-se aqui como sendo a camada limite a mistura planetária na ordem de centenas de metros de altura. O fluxo transpiratório é uma medida em escala aproximada que varia de acordo com a morfologia geral da vegetação (0 – 1), sendo para as florestas em torno de 0,2 e para as áreas de pastagem em torno de 0,8 (altamente acoplada à atmosfera).

A Eq.(9) determina a importância relativa destes controles na determinação da transpiração potencial (m d^{-1}) para uma unidade de área da parte aérea da vegetação:

$$\begin{aligned} \text{transp pot} = & \\ & (\text{transp canop}(1 - \text{mac canop decoup}).(\text{mac wat str cf} + \\ & \text{evap pot}.\text{mac canop decoup}).\text{mac IAF} \end{aligned} \quad (9)$$

Em que:

trans_canop – É a condutância da vegetação (m d^{-1}), a qual varia até uma taxa máxima da planta em função do déficit de saturação de vapor atmosférico;

mac_cano_decoup – É o fator de desdobramento adimensional para a vegetação de macrófitas;

mac_wat_str_cf – É a função de controle adimensional (0-1) indicando a extensão relativa do estresse de água da planta;

Mac_IAF – É a variável (vinculada a biomassa) que relaciona o índice de área foliar da planta com a área superficial onde se encontra o cultivo; e

evap_pot – É a evaporação potencial Eq. (7) calculada (m d^{-1}).

Portanto, a transpiração potencial pode ser significativamente controlada pela resposta da planta às limitações hídricas em um extremo do formato da vegetação; que responde primeiramente ao fluxo radial de calor quando a vegetação está bastante acoplada à atmosfera.

A transpiração atual é uma função da água disponível nas zonas saturadas e não saturadas, distribuída relativamente em relação à profundidade em que se encontram as raízes. Quando a profundidade do sistema radicular é maior ou igual à profundidade da camada saturada de solo, assume-se que todo o fluxo transpiratório que existe é produto da água oriunda desta camada. À medida que o nível de água da zona saturada é rebaixado em relação à zona radicular, as raízes retiram água por meio da capilaridade de uma forma exponencial decrescente, extraindo o resto da umidade existente na zona de armazenamento não saturada:

$$st\ wt\ transp = transp\ pot.\ cell\ area.\ exp\ (-10.\max(Unsat\ depth - NPhBio\ root\ depth, 0)) \quad (10)$$

Em que:

sat_wat_transp – É o fluxo atual de transpiração oriundo do armazenamento saturado ($m^3\ d^{-1}$);

NPhBio_root_depth – É a profundidade do sistema radicular (m); e

transp_pot – É o fluxo transpiratório potencial ($m\ d^{-1}$): uma relação complementar existe para o fluxo do armazenamento não saturado.

No modelo assume-se que no armazenamento saturado, o fluxo de água horizontal é estável e unidirecional em um aquífero homogêneo e não confinado. A equação básica de Darcy é aplicada ao fluxo entre duas células da seguinte maneira:

$$Sat\ wt\ flow = \frac{(tot\ water\ head - tot\ wat\ headExt)}{cell\ width} . sat\ hydr\ conduct . cell\ width . sat\ avg\ hd \quad (11)$$

Em que:

Sat_wt_flow – É o fluxo líquido de água ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) entrando ou saindo da célula;
 tot_water_head – É a pressão total da água (m), que é a soma da carga de água da zona saturada mais a profundidade do nível de água, para situações onde a altura de água saturada alcança a superfície do meio poroso;

tot_wat_headExt – É a pressão análoga de água (m) de uma célula externa;

cell_width – É a largura de uma célula quadrada (m);

sat_hydr_conduct – É a condutividade hidráulica saturada (m d^{-1}); e

sat_avg_hd – É a pressão média da água na zona saturada (m) em duas células.

A pressão total de água é utilizada para acomodar qualquer diferença na elevação entre duas células quando a água superficial estiver presente para alterar o gradiente hidráulico.

iii.3) Interceptação

Parte da precipitação é interceptada pela vegetação e por outras estruturas da paisagem, evaporando-se antes mesmo de chegar ao solo. A interceptação por este tipo de cobertura vegetal varia entre 10% e 30% da precipitação (SHUTTLEWORTH, 1993) e depende da capacidade de armazenamento do dossel, além da natureza e padrão da chuva. Assume-se que a quantidade de água que pode ser interceptada pela vegetação é proporcional a biomassa total:

$$H_I = \max (\epsilon_1 \cdot R, \epsilon_2 \cdot IAF) \quad (12)$$

Em que:

IAF – É o índice de área foliar;

ϵ_1 – É o parâmetro de interceptação que depende do tipo de paisagem;

ϵ_2 – É o parâmetro de interceptação da vegetação; e

R – É a quantidade de chuva (m).

De tal forma que só uma determinada quantidade de água é interceptada em qualquer evento de precipitação e o restante atinge o solo.

iii.4) Evaporação e transpiração

A evaporação é o processo físico que transforma paulatinamente a água no estado líquido, que se encontra acumulada nos corpos d'água ou na superfície do solo, em vapor d'água, retornando novamente a atmosfera (FIGURA 45).

Figura 45 – Principais fatores que afetam a evaporação
Fonte: Voinov et al. (2004)

A evaporação potencial (medida no tanque classe “A”) na superfície (m d^{-1}) pode ser incorporada ao modelo de duas maneiras: a primeira delas é a partir de dados de estações climatológicas e a segunda pode ser calculada pelo método de Christiansen (SAXTON; McGUINNESS, 1982). Este método utiliza valores de temperatura (T °C), radiação solar (SolRadGrd), velocidade do vento (W) e umidade relativa do ar (H) como variáveis independentes. Quando a fonte de água é um organismo vivo, o processo é conhecido como transpiração.

No que concerne à água que é evaporada pelas plantas, estas absorvem a água do solo ou do subsolo através das raízes e a conduzem para as folhas, onde ali, finalmente, é liberada para a atmosfera por meio dos estômatos.

O processo conjunto de transferência de água para a atmosfera, tanto por evaporação quanto por transpiração é conhecido como evapotranspiração.

A fração do terreno que é coberta pela vegetação pode ser medida por meio do índice de área foliar (IAF) de tal forma que, a quantidade total de evapotranspiração é:

$$H_T = (IAF)TR + [1 - \min(1, IAF)]E \quad (13)$$

Em que:

$E = C_e H E U_r$ – É a evaporação do solo;

C_e – É a taxa de evaporação do solo;

HE – É a taxa de evaporação da água ao ar livre anteriormente definida;

U_r – É a proporção de umidade relativa ($U = U/P$, onde U é a proporção de umidade e P é a porosidade do meio poroso – solo); e

TR – É a transpiração total.

Quando IAF é maior que um pode-se supor que não existe uma superfície aberta disponível e que o processo de evaporação é baixo ou quase nulo e TR é predominante. TR é composta pela transpiração da camada não saturada do solo (TR_u) e pela transpiração da camada saturada do solo (TR_s).

$$TR = TR_u + TR_s = (\theta)TR + (1 - \theta_v)TR \quad (14)$$

Onde, θ é a proporção da transpiração da camada saturada:

$$\theta_v = \begin{cases} \frac{W_d \cdot UW_d}{(R + R_{exp})} & \text{si } R + R_0 > UW_d \\ 1 & \text{si } R + R_0 < UW_d \\ 0 & \text{si } UW_d = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Em que:

UW_d – É a profundidade da camada não saturada;

R – É a profundidade da zona radicular;

R_0 – É a distancia até a zona saturada onde o efeito de capilaridade é acentuado;

R_{exp} – É o índice de capilaridade de sucção da raiz desde a camada não saturada, que disponibiliza a água da zona saturada ainda que as raízes não sejam suficientemente grandes para alcançá-las ($UW_d > R$):

$$R_{exp} = \exp[-10(UW_d - R)] \quad (16)$$

$$W_A = \min \left[1, R_{exp} + \begin{cases} 0 & \text{si } U < U_w \\ 1 & \text{si } U > U_w \\ \frac{(U-U_w)}{(U_d-U_w)} & \text{de otra manera} \end{cases} \right] \quad (17)$$

Em que:

W_A – É o índice de disponibilidade de água. Este indica que a água não está disponível quando U é menor que o ponto de murcha (U_w). Estima-se que este último tem um valor igual a 10% do valor da capacidade de campo. Quando a proporção da umidade da zona saturada U é maior que U_d (normalmente 50-60% da capacidade de campo U_f), a água está completamente disponível, em qualquer outro caso retorna-se um valor intermediário. Posteriormente esses processos são modificados pela ação da capilaridade. Dessa forma a água encontra-se potencialmente disponível ainda que a zona não saturada encontre-se completamente seca. Sempre e quando as raízes se encontrarem próximas da área de armazenamento da zona saturada.

Para calcular a transpiração potencial TR_p o modelo considera o método de cálculo da evapotranspiração de Penman-Monteith, que é considerado atualmente o método mais avançado utilizado para esta finalidade na hidrologia.

A equação é complexa e está devidamente documentada na literatura científica (SHUTTLEWORTH, 1993). Este método calcula a quantidade de água transferida para a atmosfera em função das condições climatológicas (temperatura, umidade, radiação solar e velocidade do vento) e das características da vegetação como o índice de área foliar. Devido à pouca disponibilidade de dados, é possível, que em algumas ocasiões,

seja difícil parametrizar a equação de Penman-Monteith. Existem métodos alternativos menos confiáveis que o de Penman-Monteith, mas que podem ser utilizados fornecendo uma primeira aproximação da evapotranspiração na área de estudo.

Para o cálculo da evapotranspiração, o modelo desenvolvido, também inclui o método de Thornthwaite (1948). Este método somente necessita dos valores médios mensais de temperatura e da duração do dia. Todavia, este método não é tão confiável quanto o de Penman-Monteith.

A transpiração é calculada a partir da transpiração potencial, considerando o índice de disponibilidade de água (W_A):

$$TR = C_{tr} TR_p W_A \quad (18)$$

Em que:

C_{tr} – É a taxa de transpiração que depende do hábitat; e

TR_p – É a taxa de transpiração obtida através do método de Penman-Monteith (SHUTTLEWORTH, 1993) ou do método de Thornthwaite (1948).

iii.5) Infiltração

Assume-se que a chuva infiltra imediatamente na zona não saturada. A infiltração é definida pelo potencial de infiltração e pela disponibilidade de armazenamento na camada não saturada e que pode ser ocupado. O potencial de infiltração (I_p) é caracterizado pelas propriedades da superfície que são dadas por:

$$I_p = C_{Hab} \frac{C_s}{C_{SI}} \quad (19)$$

Em que:

C_s – É a taxa de infiltração em função da textura do solo ($m\ d^{-1}$);

C_{Hab} – É o modificador do tipo de habitat ($0 < C_{Hab} < 1$); e

C_{SI} – É o modificador da declividade (graus).

A capacidade de não saturação é dada pelo volume total de poros no solo, que não são preenchidos pela água (U_c).

$$U_c = UW_d(P - U) \quad (20)$$

Em que:

P – É a porosidade do solo.

Se I_p é menor que a capacidade insaturada, então a infiltração potencial é efetuada e a infiltração efetiva fica descrita como; $HF=I_p$ se $I_p > U_c$, o que significa que a água que entra irá preencher todos os poros, eliminando efetivamente a zona não saturada, tornando-a saturada. Neste caso, todo o fluxo infiltrado foi canalizado em direção ao armazenamento na zona saturada. Juntando-se aí a água disponível da zona saturada e colocando UW num nível igual a zero. Toda a água que sobra depois do processo de infiltração é água superficial que se torna disponível para o fluxo horizontal (FIGURA 46).

Major factors affecting infiltration

Figura 46 – Principais fatores que afetam a infiltração
Fonte: Voinov et al. (2004)

iii.6) Percolação

Devido à força gravitacional, certa quantidade de água percola, desde a região de armazenamento da camada não saturada até se encontrar com a camada saturada (FIGURA 47).

Figura 47 – Percolação
Fonte: Voinov et al. 2004

Somente a água que excede a capacidade de campo está disponível para percolar. Quando a proporção de umidade está abaixo da capacidade de campo, toda a água é retida por capilaridade e forças aderentes. Desta forma, a quantidade de água disponível para percolação é dada por:

$$U_e = U - U_f \quad (21)$$

A taxa de percolação é definida pela equação:

$$H_p = 2C_{vc}P \left(\frac{U_e^{0.4}}{(P - U_f)^{0.4} + U_e^{0.4}} \right) \quad (22)$$

Em que:

C_{vc} – É o parâmetro da condutividade hidráulica vertical que depende da textura do solo.

Além do processo de percolação, existe, transferência adicional de água da camada não saturada em direção à camada saturada toda vez que o lençol freático se move acima. Neste caso, a água que está nos poros da zona não saturada agrega-se a água que provêm da camada saturada. Essa quantidade é igual a:

$$H_{p0} = \max(0, U \cdot D_h) \quad (23)$$

Em que:

$D_h = UW_d(t) - UW_d(t-1)$ – É a variação da profundidade da camada não saturada, após uma unidade de tempo. Por outro lado, se o lençol freático diminui a umidade na capacidade de campo, se mantém no solo e se junta ao armazenamento na camada não saturada:

$$H_{p1} = \max(0, U_f D_h) \quad (24)$$

Com base no modelo conceitual e nas relações matemáticas anteriormente descritas, foi construído o diagrama de estoque e fluxos do modelo de simulação objeto deste estudo.

2.2.3.2.3 Parâmetros do modelo

Nesta secção descreve-se o desenvolvimento metodológico e a forma de processamento dos dados para a parametrização do MOVA.

É importante mencionar que ainda que o MOVA tenha sido parametrizado para a sub-bacia das Posses, Extrema, MG, ele pode ser aplicado em outros lugares usando os parâmetros específicos do local de interesse. Visando atender essas situações, foram sistematizadas no ANEXO D, uma serie de alternativas metodológicas para a coleta de dados e para a estimativa de calculo de alguns dos processos considerados no MOVA.

Os parâmetros do MOVA foram obtidos a partir de fontes de informação com os seguintes formatos: cartografia digital, cartografia impressa, informação bibliográfica, bases de dados de organismos governamentais e não governamentais e o comitê das bacias PCJ. As fontes principais de informação foram a cartografia impressa e digital elaboradas pelo cadastro técnico municipal da Prefeitura Municipal de Extrema. Os modelos digitais de elevação e os dados topográficos vetoriais foram adquiridos em formato digital a escala 1:50.000.

i) Características do relevo

Os parâmetros com relação às características do relevo e geográficas foram obtidas do Modelo Digital de Elevação, escala 1:50.000 da Prefeitura Municipal de Extrema. As características consideradas podem ser observadas na TABELA 8.

Tabela 8 – Características geográficas e topográficas

Fator	Parâmetros	Unidade de medida
Características do relevo e geográficas	Altitude	m.s.n.m.
	Inclinação	Graus de inclinação
	Latitude do local	Graus

A latitude do local proporcionada por coordenadas geográficas do centróide do local é utilizada no cálculo da radiação solar atmosférica.

A sub-bacia das Posses se encontra localizada a 973 metros de altitude, na latitude 22°51'18"S e na longitude 46°19'04"O. As Posses têm uma área de 1.201,94 hectares.

A inclinação do local esta apresentada em mapas mesmo que a altitude com valor de um aonde não existe inclinação e de nove aonde se da a inclinação máxima. Para essa valoração foi necessário gerar valores equivalentes no MOVA que vão de um a nove e que representam os graus de inclinação do local a simular (TABELA 9).

No modelo assume-se que quando a inclinação é maior, a taxa de infiltração é menor. A inclinação das encostas por donde escoar a água excedente, se expressa em porcentagem de inclinação ou em graus de inclinação. Os valores de entrada vão de zero a 90 graus.

Tabela 9 – Intervalos de inclinação

Valor no mapa	Graus	Porcentagem de inclinação	Descrição do intervalo
1	0-5	0-11	Quase plano a ligeiramente inclinado
2	6-10	12-22	Ligeiramente inclinado a fortemente inclinado
3	11-15	23-33	Fortemente inclinado a moderadamente ondulado
4	16-20	34-44	Moderadamente ondulado à moderadamente íngreme
5	21-25	45-55	Moderadamente íngreme a íngreme
6	26-30	56-66	Íngreme a muito íngreme em pé de serra
7	30-40	66-90	Muito íngreme a encosta pouco transitável
8	41-60	91-133	Encosta pouco transitável a encostas íngremes
9	> 60	133-200	Encostas íngremes a íngreme profundo intransitável

No caso da sub-bacia das Posses aonde o MOVA foi aplicado tem-se um porcentagem de inclinação dominante que oscila entre 12% e 45%.

ii) Vegetação

A vegetação é um fator importante para os processos de captação de água. Esses processos são afetados principalmente por a altura da vegetação, a densidade da folhagem e a profundidade das raízes (TABELA 10).

Tabela 10 – Variáveis do fator vegetação

Fator	Parâmetros potenciais	Unidade de medida
Vegetação	IAF (índice de área foliar)	s/u
	Profundidade das raízes	m
	Altura da vegetação	m

O índice de área foliar (IAF) é a área coberta pelas folhas por unidade de área de superfície. Os valores do IAF são importantes para os processos de interceptação e evaporação da água.

De forma geral, em Brasil não é possível obter séries de tempo para o IAF acessíveis ao público. Dessa maneira, foram usados dados contidos no estudo de

Scurlock et al. (2001) que dão um IAF médio para florestas tropicais primárias (similares à vegetação do local de estudo) de 5,45.

No entanto, é importante esclarecer que esse dado foi utilizado só para rodar o MOVA, já que não existem dados para a área de estudo. Quando exista disponibilidade de dados locais esse dado deverá ser substituído. Para obter esse dado sugere-se a utilização no local de estudo de métodos simples de medição como os medidores de área foliar ou os densiômetros.

Outras formas de medição do IAF podem ter maior custo, podendo, no entanto, proporcionar informações de maior qualidade e precisão como é o cálculo do IAF através de análises de imagens de satélite da alta resolução com formatos como: Ikonos ou QuickBird entre outros, para maior detalhes consultar os trabalhos de Running e Hunt (1993).

Ainda que seja recomendável contar com valores temporais do IAF, é preciso reconhecer que essa informação é difícil de obter ou se gerar, recomendando-se então, obter pelo menos uma estimativa da queda de folhas no lugar e/ou usar o IAF determinado para diferentes tipos de vegetação de acordo aos dados publicados por Scurlock et al. (2001), empregados nesta pesquisa ou os dados de Roberts et al. (1996).

A profundidade das raízes é também uma variável importante no MOVA e depende do tipo de espécies que existem em um lugar em particular, assim como também é o caso da profundidade do solo e da profundidade e penetrabilidade do manto rochoso.

No caso das Posses não foram encontrados dados publicados para esse parâmetro, e de forma geral é uma informação difícil de obter-se. Recomenda-se então, que tal variável seja inferida através da experiência de botânicos, ou se possível medida no campo, ou mesmo empregar então, os valores gerados por Canadell et al. (1996) apresentados na TABELA 11 e que foram usados no MOVA.

Tabela 11 – Profundidade das raízes segundo o grupo funcional de crescimento

	Árvores	Arbustos	Herbáceas, pastagem	Culturas anuais
Profundidade	7,0±1,2 m	5,1±0,8 m	2,6±0,1 m	2,1±0,2 m

Fonte: Canadell et al. (1996)

A altura da vegetação é uma variável relativamente fácil de obter. Podendo ser diretamente medida no campo e/ou utilizando o mapa de uso do solo e vegetação, escala 1:50.000 gerado pela Prefeitura de Extrema e usado neste trabalho. Na área de nascente da sub-bacia das Posses a altura arbórea oscila entre 10 m e 15 m. Na área mediana a altura da vegetação esta entre 15 m e 20 m; e na área de foz a altura arbórea esta entre 10 m e 15 m (EXTREMA 2005a).

iii) Características físico-químicas do solo

Em relação às características do solo o único parâmetro que deve ser introduzido no MOVA é o tipo de textura. No caso da sub-bacia das Posses as texturas dominantes são: Argilosa, Muito Argilosa e Franca (ANEXO E).

Os valores de porosidade, condutividade hidráulica, frente de molhamento, capacidade de campo e taxa de infiltração associam-se no MOVA ao tipo de textura. Como demonstrado na descrição matemática do modelo, essas variáveis influenciam os intercâmbios de água entre a zona superficial, a zona não saturada e a zona saturada.

Excetuando as taxas de infiltração, os parâmetros utilizados foram os calculados por Clapp e Hornberger (1978) e Rawls, Brakensiek e Miller (1983), (TABELA 12).

Tabela 12 – Parâmetros de Green-Ampt para várias texturas de solo

Textura	Chave	Porosidade (ϕ)	Condutividade hidráulica KfSat (m d^{-1})	Potencial matricial da frente de molhamento (Ψ_s) (m)	Fator “b”	Capacidade de campo (U_{fc}) ²
Areia	A	0,3950	15,2064	0,1210	4,05	0,0556
Franco arenosa	Ca	0,4100	13,4784	0,0900	4,38	0,0625
Arenosa Franca	Ac	0,4350	2,9981	0,2180	4,90	0,0970
Franco Limosa	Cl	0,4850	0,6221	0,7860	5,30	0,1543
Franca Franco	C	0,4510	0,6005	0,4780	5,39	0,1334
Areno-Argilosa	CAr	0,4200	0,5443	0,2990	7,12	0,1563
Franco Limo-Argilosa	CLr	0,4770	0,1469	0,3560	7,75	0,1968
Franco Argilosa	Cr	0,4760	0,2117	0,6300	8,52	0,2275
Argila Arenosa	Ra	0,4260	0,1875	0,1530	10,40	0,2031
Argila Limosa	RI	0,4920	0,0890	0,4900	10,40	0,2623
Argila	R	0,4820	0,1106	0,4050	11,40	0,2670

Fonte: Modificado de Clapp e Hornberger (1978); Rawls, Brakensiek e Miller (1983)

No que concerne as taxas de infiltração do solo, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), publicou no Manual de Hidrologia e Hidráulica (ESTADOS UNIDOS, 1993) a descrição de quatro grupos de solos (TABELA 13).

Tabela 13 – Descrição dos grupos de solos com base nas suas características hidrológicas

Tipo	Descrição
A	Solos que têm taxas de infiltração altas quando o solo está saturado. Consiste principalmente de areias ou areias grossas tipo cascalho. É uma camada profunda e excessivamente drenada. Estes solos apresentam alta taxa de infiltração de água (baixo potencial para escoamento). Areias com pouco sílte e argila.
B	Solos que apresentam taxa de infiltração moderada quando o solo está completamente saturado. São solos ligeiramente profundos a profundos e apresentam moderada transmissão de água.
C	Solos que apresentam infiltração lenta quando completamente molhados, principalmente com uma camada que impede o movimento ascendente de água lenta. Estes solos apresentam lenta transmissão de água (alto potencial para escoamento).
D	Solos que apresentam taxa de infiltração muito lenta quando estão completamente inundados, compostos principalmente por argilas. São solos com lâmina de água permanentemente alta, pouco profundos acima de materiais quase impenetráveis e apresentam transmissão de água muito lenta (condutividade hidráulica).

Fonte: Estados Unidos (1993)

O USDA classificou esses quatro grupos de solos, de acordo as características hidrológicas e calculou no laboratório as taxas de infiltração (TABELA 14). Como é possível observar as maiores taxas de infiltração são apresentadas pelos solos arenosos e as menores pelos solos argilosos.

Essas taxas de infiltração foram as utilizadas no MOVA por falta de dados específicos do local de estudo. Nesse aspecto é importante considerar que tais taxas são uma estimativa de caráter geral do processo de infiltração. A literatura especializada indica que existem outras características do solo que influenciam nesse processo e métodos mais confiáveis de avaliação. Ao ter informações mais precisas para o local de interesse é recomendável usar essas informações em vez das taxas propostas na TABELA 14 usadas neste trabalho.

Tabela 14 – Taxas de infiltração usadas no MOVA segundo a textura do solo

Textura	Chave	Grupo hidrológico	Taxa de infiltração (m d ⁻¹)	
			Mínimo	Máximo
Areia	A	A	0.1824	0.2736
Franco arenosa	Ca	A	0.1824	0.2736
Arenosa Franca	Ac	A	0.1824	0.2736
Franco Limosa	Cl	B	0.0912	0.1824
Franca	C	B	0.0912	0.1824
Franco Areno-Argilosa	CAr	C	0.0312	0.0912
Franco Limo-Argilosa	CLr	D	0.0000	0.0312
Franco Argilosa	Cr	D	0.0000	0.0312
Argila Arenosa	Ra	D	0.0000	0.0312
Argila Limosa	Rl	D	0.0000	0.0312
Argila	R	D	0.0000	0.0312

Fonte: Estados Unidos (1993)

iv) Hidrologia

No MOVA é necessário incluir os valores da profundidade a que se encontra o lençol freático, expressados em metros e a longitude da rede hidráulica contida numa célula (TABELA 15).

Tabela 15 – Variáveis do fator hidrológico

Fator	Parâmetro	Unidades
Hidrologia	Longitude da rede hidráulica na célula.	m
	Altura da tabua de água (nível freático).	m

A altura da água subterrânea (profundidade na qual se encontra a cabeça de água) foi obtida usando a profundidade do aquífero sobre o que se encontra o local simulado.

A sub-bacia das posses encontra-se sobre o aquífero Cristalino (Pré-Cambriano ao Cambriano) (IRRIGART, 2005). É a unidade aquífera de maior extensão nas Bacias PCJ, com 6.884,06 km², sendo 5.636,59 km² na Bacia do Piracicaba, 322,37 km² na Bacia do Capivari e 925,10 km² na Bacia do Jundiaí. Está composto por unidades predominantemente do Pré-Cambriano, mas também do Cambriano. A hidráulica dos poços cadastrados apresenta uma profundidade média de 5 m a 150 m neste aquífero, dados que foram usados neste trabalho para determinar a altura média da água subterrânea.

No que concerne a longitude da rede hidráulica, tal variável mede-se somente na célula de aplicação do simulador e resulta da somatória da longitude dos rios e riachos que se encontram nessa célula. Essa variável só tem sentido no modelo quando se desejar espacializar a simulação para mais de um local. Se o propósito é utilizar o modelo de maneira localizada, como nesta situação, a longitude da rede hidráulica pode ser omitida.

v) Clima

Esse fator está composto por variáveis importantes, relacionadas a processos hidrológicos como: a evaporação, a precipitação e a evapotranspiração. São variáveis que normalmente se encontram na forma de séries temporais (TABELA 16).

Tabela 16 – Variáveis do fator clima

Fator	Parâmetro	Abreviatura	Unidades
Clima	Temperatura media do ar	T (°C)	°C
	Precipitação vertical	PP	mm
	Evaporação direta	E	m/d
	Velocidade do vento	WKm	km/hr
	Umidade relativa do ar	UR	%

Os dados para essas séries temporais geralmente são obtidas de estações metrológicas distribuídas ao longo do território nacional. Essas estações registram de forma automática valores de radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura e precipitação.

Para a sub-bacia das Posses, no entanto, não existem esses tipos de séries pelo que se decidiu então, usar dados de um local próximo a área de estudo: o município de Bragança Paulista, a fim de poder utilizar o MOVA.

Os dados de temperatura e precipitação (ANEXO F) foram extraídos da base de dados do IAC; os dados de umidade relativa média do ar foram coletados do SIGAM, (www.sigam.ambiente.gov.br); e a velocidade média do vento foi coletada do Atlas de Potencial Eólico do Brasil (www.cresesb.cepel.br) considerando 2008 como ano básico de referencia.

Os dados de evaporação direta não foram encontrados pelo que se optou por omitir sua utilização.

A latitude do local é utilizada para o cálculo da radiação solar através do método de Allen et al. (1998). Os valores da radiação solar apresentam-se em séries diárias de tempo. Esses dados são necessários para calcular a evapotranspiração usando o método de Christiansen (1968) e a evapotranspiração através do método de Penman-Monteith.

A radiação solar, usada no MOVA, é preferível que seja introduzida em séries diárias de tempo em caso de não contar com essas series podem ser usados então, os dados médios mensais. Ao utilizar esses últimos é preciso assumir o erro de simulação gerado.

O MOVA pode estimar a evapotranspiração por dois métodos. Um deles é o método de Penman-Monteith; o outro é o método de Thornthwaite (1948). Neste estudo os cálculos usados para estimar Thornthwaite apresentam-se no ANEXO G.

2.2.3.3 Validação do modelo matemático

Para estudar o comportamento real de um sistema, é necessário que o modelo consiga reproduzi-lo. De acordo com Forrester (1980), na Dinâmica dos Sistemas, a validação dos modelos de simulação se julga de acordo com suas conveniências e utilidade. É preciso confiar em seu comportamento sob circunstâncias limitadas e de acordo com um objetivo específico. Para Ruth e Hannon (1994), o modelo de simulação dinâmica deve somente capturar os fatores essenciais de um sistema real, sendo necessário abstrair os demais fatores. Sua validação deve ser considerada de acordo com a consistência lógica de sua estrutura interna.

O processo de validação de um modelo baseado em Dinâmica de Sistemas tem como alvo principal estabelecer a sua validade estrutural com respeito aos objetivos para que ele fosse construído: este é o aspecto determinante. Isto porque a intenção de um estudo conduzido sob essa ótica é servir de base para a avaliação de diferentes estratégias e políticas que permitam melhorar o desempenho do sistema (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006). Contudo, aperfeiçoar o comportamento de um sistema, só tem sentido a partir do momento em que se tem a confiança na estrutura do modelo. Uma

vez que este é construído de forma confiável, devem-se efetuar testes de validação, cuja ênfase deve ser orientada prioritariamente aos padrões da predição, mais do que a resultados precisos, particularmente, quando se trata de modelos projetados para fornecer uma visão de longo prazo do comportamento dos sistemas em estudo (BARLAS, 1996).

Um assunto importante de mencionar é que a validação de um modelo a través de uma serie de dados e puramente operacional. Nesse aspecto a correspondência entra a saída do modelo e os dados observados não garante que a base científica do modelo e sua estrutura interna correspondam aos processos atuais ou as relações causa-efeito que operam no sistema real. Ainda que seja um paradoxo não é certo que boas predições possam ser obtidas, só a partir de um modelo mecanicamente correto (RYKIEL, 1996).

Na validação do MOVA, tomamos como ponto de partida um modelo conceitualmente validado (o balanço de água) e que há sido revisado (tem-se revisado detalhadamente as equações e sua instrumentação no computador).

Como mencionado na parte de material e métodos, o MOVA simula o processo “terrestre” do ciclo hidrológico e não inclui o caminho da água em canais, ribeirões e rios. A calibração desta classe de modelos pode ser feita com muita precisão, quando se tem dados suficientes para cada um dos processos incluídos em sua construção. Em geral para efetuar a calibração se requiere, de series de dados temporais de períodos longos, isso significa custos muito elevados, sendo em muitas ocasiões inacessíveis. Devido a essas limitantes é que o processo de calibração do modelo devera ser feito em outro estudo. Recomenda-se revisar os métodos de calibração de Villa et al. (2004) e Voinov et al. (2004) e programas que contam com ferramentas desenvolvidas especificamente para esse fim (NEITSCH et al., 2002).

2.3 Resultados e discussões

Nesta parte apresentam-se os resultados e discussões derivadas da aplicação do MOVA na área de estudo. Entretanto, é importante esclarecer que o objetivo principal deste trabalho foi a formulação do modelo de valoração ecológica de SEH, iniciando-se por sua conceitualização, dando seqüência à formalização e concluindo com a

simulação. Devido a critérios de ordem metodológica, as etapas de conceitualização (secção 2.2.3.1) e de formalização (secção 2.2.3.2) do MOVA, fazem parte do conteúdo da secção de “Material e métodos”. Dessa maneira, nesta secção, estão incluídos os resultados e discussões da parte de simulação (aplicação do MOVA).

2.3.1 Etapa de simulação: aplicação do MOVA

A escala temporal do modelo foi definida de acordo com a natureza do problema e ao objetivo baseado no qual ele foi formulado. Neste estudo, o MOVA foi desenvolvido para a valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos, ou seja, para a estimação anual dos fluxos destes serviços, (na área de parametrização do modelo: sub-bacia das Posses, Extrema, MG), por meio de uma análise dos processos ecossistêmicos. Processos estes que geram fluxos de serviços de água superficial, água infiltrada e água armazenada.

O MOVA através de uma perspectiva sistêmica destes fluxos de serviços pode auxiliar no monitoramento e avaliação do projeto piloto de pagamentos por serviços ecossistêmicos implementado na área de estudo.

O processo de simulação do modelo compreende diferentes cenários para a determinação dos fluxos de SEH, de acordo com as seguintes especificações:

- i) Horizonte temporal: se propõe a um horizonte de 365 simulações. Cada simulação é caracterizada por unidade/dia que determina um horizonte de tempo de um ano;
- ii) Passagem do tempo ou timestep: refere-se à passagem do tempo que é de uma unidade; e
- iii) Método de integração: utilizam-se equações diferenciais para descrever as relações complexas na dinâmica do sistema, resolvidas por intermédio do método de Euler, que é o método mais freqüentemente utilizado; e este caracterizou-se pela adaptação de um fluxo constante durante o passar do tempo ou timestep (STELLA, 2001).

Utilizando-se de uma interface amigável, torna-se fácil a experimentação com o sistema (FIGURA 48).

Na FIGURA 48, apresentam-se os dados e procedimentos necessários de serem incorporados ao modelo, de modo que possa ser possível de ser aplicado num determinado espaço geográfico. Foi realizada a seleção dos componentes ou “entradas” mais importantes, configurados por meio de ícones interativos, permitindo estabelecer um laboratório do sistema que permite simular políticas e cenários, a fim de descobrir novas idéias e a possibilidade da geração de novos questionamentos.

UMIDADE
VELOCIDADE VENTO
ALTURA VEGETACAO
PRECIPITACAO EM MM
IAF

?

?

?

?

?

TEMP MIN AR C
TEMP MAX AR C
DIAS COM NEBLINA
DIRECTA
ET THORNTHWAITE

?

?

?

?

?

TEXTURA[AREIA]

TEXTURA[FRANCO ARENOSO]

TEXTURA[ARENOSO FRANCO]

TEXTURA[FRANCO LIMOSO]

TEXTURA[FRANCO]

TEXTURA[FRANCO ARENO ARGILOSO]

TEXTURA[FRANCO LIMO ARGILOSO]

TEXTURA[FRANCO ARGILOSO]

TEXTURA[ARGILO ARENOSO]

TEXTURA[ARGILO LIMOSO]

TEXTURA[ARGILA]

TEXTURA[LOCAL]

?

?

DIRETA

INDIRETA

THORNTHWAITE

PENMAN MONTHEITH

U

INGRESSE OS SIGUENTES VALORES INICIAIS

▼

ELEVACAO MSMM	973
LATGRAUSDEC	-22,855
PROFUNDIDADE LENCOL FREATICO EM METROS	5
PROFUNDIDADE RAIZES EM METROS	7
C DECLIVIDADES	3
TIPO DE HABITAT	2

Valores Acumulados Anuais

AGSUPmcubha	0.786375
AGINFILmcubha	3166.584854
AGARMmcubha	5440.731111

DIA	365
AGUA SUPER FICIAL	0.000000
ZONA NAO SATURADA	3.305909
ZONA SATURADA	5.866651

Figura 48 – Interface do MOVA

A interface do MOVA (FIGURA 48) compreende uma série de ícones interativos. Os ícones que contem os parâmetros de UMIDADE (umidade relativa do ar),

VELOCIDADE VENTO, ALTURA VEGETAÇÃO, PRECIPITAÇÃO EM MM, IAF, TEMPERATURA MIN AR C, TEMPERATURA MAX AR C, DIAS COM NEBLINA, DIRETA, INDIRETA, THORNTHWAITE, e PENMAN MONTEITH contem em cada um deles o botão: ao clicar nesse botão encontram-se as indicações a respeito das quais e como devem ser inseridos os dados.

Com respeito ao parâmetro textura do solo, a interface possui doze (12) classes diferentes. A classe chamada de “Local” refere-se à textura de solo específica da área de interesse. Se essa classe é a escolhida será preciso incorporar no modelo os parâmetros específicos de: porosidade, condutividade hidráulica, taxa de infiltração, capacidade de campo e condutividade vertical, associados a tal textura de solo. Neste caso, o modelo trabalha com uma textura por vez.

A evaporação na superfície ($m\ d^{-1}$) pode ser incorporada ao modelo de duas maneiras: i) a partir de dados de estações meteorológicas (na interface clicar no ícone DIRETA), ou ii) calculada a partir do método de Christianssen (1968) (na interface clicar no ícone INDIRETA). Esse modelo usa os valores de temperatura em graus °C, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar como variáveis independentes. Excetuando a radiação solar que é calculada internamente pelo MOVA, os dados dos outros parâmetros devem ser inseridos em séries de tempo.

O MOVA pode calcular a evapotranspiração de duas formas: i) usando o método de Penman-Monteith ou ii) usando o método de Thornthwaite. Este último requer somente os dados de temperatura média mensal e as horas-sol por dia (insolação), mas é menos confiável que o primeiro. Quando possível é melhor usar o método de Penman-Monteith. Se o método escolhido é o de Thornthwaite é preciso fazer os cálculos num outro aplicativo como, por exemplo, o Excel e inserir os dados no ícone da série de tempo respectiva.

Para aplicar o MOVA, devem ser inseridos valores iniciais de altitude do local, latitude, declividade, profundidade do lençol freático, profundidade das raízes da cobertura vegetal analisada e o tipo de habitat. O modelo diferencia três tipos de habitats: corpos de água, florestas ou matas e culturas.

Na interface podem ser observados os resultados das quantidades anuais dos fluxos de SEH estimados pelo MOVA: água em superfície, água infiltrada e água

armazenada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Podem também ser observados, os níveis diários dos estoques de água superficial, água na zona não saturada e água na zona saturada em m d^{-1} , na superfície mínima de aplicação do modelo que é de 200m x 200m.

2.3.2 Cenários avaliados na sub-bacia das Posses

O modelo desenvolvido neste estudo foi usado para estimar fluxos de SEH (valoração ecológica) que repercutem na quantidade de água disponível. Esses serviços resultantes do ciclo hidrológico dependem de diversos fatores tais como: vegetação, características geográficas e topográficas, clima, etc. (definidos na secção 2.2.3.2.3 “Parâmetros do modelo”).

Estabeleceram-se diferentes cenários para avaliar o comportamento dos parâmetros envolvidos nos processos que geram os SEH. A partir dos dados levantados sobre a área de estudo (a sub-bacia das Posses, Extrema, MG), foram elaborados e examinados trinta e seis (36) cenários (QUADRO 4) que compreendem as duas texturas de solo principais, três diferentes alturas da vegetação, três níveis de profundidade do lençol freático (águas subterrâneas) e dois métodos de cálculo da evapotranspiração. Os cenários foram utilizados para aplicar e experimentar o modelo na área de estudo e ver o efeito que tem mudanças nesses parâmetros sobre os fluxos anuais dos SEH considerados neste estudo.

2.3.2.1 Cenários considerando a altura de vegetação das áreas de nascente, de foz e mediana da sub-bacia das Posses.

Os cenários 1a até 6b se referem à altura da vegetação da **área de nascente** da sub-bacia das Posses. Essa área é caracterizada pela vegetação bastante perturbada de porte entorno de 10m de altura. O estrato arbóreo é pouco denso sendo que a espécie que apresentou a maior densidade foi a Aroeira Vermelha (*Schinus terebinthifolius*), seguida da Capororoca (*Myrsine ferruginea* e *M. umbellata*) (QUADRO 3). Os cenários 7a até 12b referem-se à altura da vegetação de 15m que é característica na **zona de foz** da sub-bacia das Posses, com estrato arbóreo pouco denso, sendo as espécies que apresentaram maior densidade a Embira de Sapo (*Lonchocarpus campestris*) seguida do Angico (*Anadenanthera colubrina*) e da *Eugenia*

verrugosa (QUADRO 3). No caso dos cenários 13a até 18b estudaram-se as condições predominantes na **zona mediana** da sub-bacia das Posses, caracterizada por árvores de porte em volta dos 20 m, sendo o estrato arbóreo bastante denso, e as espécies que apresentaram a maior densidade foi o Açoita-Cavalo (*Luehea grandiflora*), seguida da Ainhuva (*Nactandra lanceolata*) e do Bico de Pato (*Machaerium aculeatum*) (QUADRO 3).

O Quadro 4 resume as características e os resultados dos fluxos de SEH obtidos em cada cenário.

Cenários	Método de cálculo da Evapotranspiração		Descrição do cenário				Serviço de água		
			Textura Solo		Altura vegetação (m)	Profundidade lençol freático (m)	Superficial	Infiltrada	Armazenada
	T*	P-M**	Franco	Argila			(m³ ha⁻¹ ano⁻¹)		
1 a					10	5	0,8	5864,0	6103,0
1 b					10	5	0,8	6202,0	6103,0
2 a					10	5	0,8	5905,0	6485,0
2 b					10	5	0,8	6243,0	6485,0
3 a					10	150	137,0	1045,0	14965,0
3 b					10	150	138,0	851,0	15311,0
4 a					10	150	146,0	1430,0	15921,0
4 b					10	150	147,0	1055,0	16447,0
5 a					10	25	0,8	1537,0	13906,0
5 b					10	25	0,8	1413,0	14324,0
6 a					10	25	0,8	1738,0	14692,0
6 b					10	25	0,8	1721,0	15046,0
7 a					15	5	0,4	5883,0	6103,0
7 b					15	5	0,4	6167,0	6103,0
8 a					15	5	0,4	5920,0	6485,0
8 b					15	5	0,4	6208,0	6485,0
9 a					15	150	137,0	1036,0	14963,0
9 b					15	150	138,0	911,0	15222,0
10 a					15	150	146,0	1395,0	15967,0
10 b					15	150	146,0	1116,0	16374,0
11 a					15	25	0,4	1556,0	13906,0
11 b					15	25	0,4	1456,0	14247,0
12 a					15	25	0,4	1757,0	14692,0
12 b					15	25	0,4	1768,0	14966,0
13 a					20	5	0,4	5883,0	6103,0
13 b					20	5	0,4	6092,0	6103,0
14 a					20	5	0,4	5924,0	6485,0
14 b					20	5	0,4	6133,0	6485,0
15 a					20	150	137,0	1036,0	14963,0
15 b					20	150	137,0	956,0	15147,0
16 a					20	150	146,0	1395,0	15967,0
16 b					20	150	146,0	1201,0	16263,0
17 a					20	25	0,4	1556,0	13906,0
17 b					20	25	0,4	1469,0	14191,0
18 a					20	25	0,4	1757,0	14692,0
18 b					20	25	0,4	1793,0	14865,0

Quadro 4 – Quantidades de água superficial, infiltrada e armazenada obtida em cada cenário estudado (m³ ha⁻¹ ano⁻¹)

*Método de cálculo da evapotranspiração Thornthwaite

**Método de cálculo da evapotranspiração Penman-Monteith

Pode-se notar que quando a altura da vegetação e a profundidade das águas subterrâneas aumentam, também aumenta a quantidade de água infiltrada. Isto provavelmente deve-se à capacidade de exploração do perfil do solo pela vegetação de maior altura, facilitando assim a infiltração nas camadas mais profundas do solo.

Em relação à água armazenada, tal parâmetro não é influenciado pelas águas subterrâneas quando se encontram a 5m de profundidade, muito provavelmente pelo fato que existirá um aporte destas águas, por ascensão capilar. O balanço hídrico no

solo é garantido pela ascensão capilar e pela extração de água pelas raízes nas zonas mais profundas do perfil. Para profundidades maiores, não é significativo o aporte do recurso hídrico na demanda das culturas, tendo assim maior volume de água armazenado na zona saturada, muito provavelmente devido ao fato das raízes não conseguir explorar o perfil até essas profundidades. Isto é evidente para ambos os métodos utilizados para avaliar a evapotranspiração, ainda que o método de Penman-Monteith mostre-se ser mais sensível na determinação da evapotranspiração.

Quando as águas subterrâneas encontram-se entre os 5m e 25m de profundidade, a zona não saturada transforma-se num volume interessante para o armazenamento das águas, e assim a ser considerada como uma zona importante na preservação do recurso hídrico. O conhecimento das profundidades das águas subterrâneas em cada propriedade, na zona de estudo, poderá permitir definir quais são os locais mais eficientes para a conservação (armazenamento da água no meio poroso) do recurso hídrico.

Em relação às texturas de solo avaliadas, as argilas pelas características de maior porosidade, mostram-se com maior capacidade de armazenar água que os solos francos. Os solos francos porem, pelo maior tamanho dos poros, mostram-se com maior capacidade de permitir a infiltração profunda das águas provenientes da precipitação.

Os resultados obtidos com respeito à capacidade de infiltração e armazenamento de água dessas texturas de solo, coincidem com os resultados observados por Lima et al. (2008) que realizaram um trabalho para interpretar atributos pedológicos e avaliar a potencialidade de recarga de água, na sub-bacia das Posses. No referido trabalho foram usados três critérios básicos: classe de solo, tipo de horizonte A textural, e fase de relevo.

As classes de solos encontradas no trabalho, com seus respectivos tipos de horizonte A e fases de relevo, bem como o potencial de cada classe em relação ao potencial de recarga de água estão descritas no QUADRO 5.

Classes de solo	Horizonte A	Relevo	Potencial de recarga
Neossolo Litólico	Moderado	Montanhoso	(1x2x1) Baixo
Neossolo Litólico	Húmico	Suave ondulado	(1x4x3) Médio
Neossolo Flúvico	Moderado	Plano	(4x2x3) Alto
Cambissolo Hápl	Moderado	Forte ondulado	(1x2x2) Baixo
Cambissolo Hápl	Moderado	Ondulado	(1x2x2) Baixo
Cambissolo Húmico	Húmico	Ondulado	(2x4x2) Alto
Argissolo	Moderado	Ondulado	(4x2x2) Alto
Argissolo	Moderado	Forte ondulado	(4x2x2) Alto

Quadro 5 – Classes de solos, tipos de horizonte A, fases de relevo e potencial de recarga da sub-bacia das Posses em Extrema, MG

Fonte: Lima et al. (2008)

O estudo de Lima et al (2008) conclui que os *Neossolos Litólicos* em relevo montanhoso apresentaram baixo potencial de recarga de água mesmo em situações diferentes de paisagem. Entretanto, os *Neossolos Flúvicos* mostraram elevado potencial de recarga de água por estarem presentes em posição privilegiada na paisagem, próximos a rede de drenagem e possuírem relevo plano a suave a ondulado. Por último os solos do tipo *Cambissolos Háplicos* apresentaram baixo potencial de recarga de água devido à maior declividade, pequena profundidade e baixa permeabilidade, sendo considerados para a sub-bacia das Posses como os principais responsáveis pelo baixo potencial de recarga.

Os resultados obtidos por Lima et al. (2008), para as classes de solo existentes na sub-bacia das Posses e seu comportamento em relação à recarga de água são condizentes com os estudos de Ranzini et al. (2004), sobre *Cambissolos*, em relevo acidentado e sub-bacias da mata atlântica que apresentam baixo potencial de recarga, pois o potencial gravitacional da água nos solos mais declivosos é bem maior em relação às áreas mais baixas, aumentando o escoamento sub-superficial reduzindo assim, a infiltração da água em maiores profundidades .

Uma das alternativas para minimizar os efeitos do baixo potencial de recarga de água é a manutenção de uma eficiente cobertura vegetal. Uma vez que essa cobertura vegetal esteja mantida, ocorre o retardamento da movimentação de água em direção aos cursos, reduzindo o escoamento superficial, produzindo, até mesmo, um efeito tampão na capacidade de retenção de água pelos solos em períodos de maior concentração de chuvas (ZOLÍN, 2010; CARDOSO et al., 2006).

No que se refere ao parâmetro de precipitação, deve-se ressaltar, que para esta sub-bacia, o regime pluviométrico não é um fator limitante devido à elevada precipitação média anual (1.477 mm) com chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

Assim a formulação de diversos cenários permite baseado nos parâmetros considerados no MOVA selecionar os locais com maior potencial para a conservação do recurso hídrico.

Gomes et al. (2003) destacam que os mananciais brasileiros, basicamente, são dependentes de águas superficiais que decorrem, essencialmente, de manejo das bacias hidrográficas, que são as captadoras e distribuidoras da água de chuva que chega até elas.

Segundo Gomes et al. (2003), a gestão dos recursos hídricos pode ser separada em duas vertentes: i) a do Manejo de Bacias, que trata das inter-relações da água de chuva com os vários componentes da superfície, em especial o escoamento e infiltração e a erosão; e ii) aquela que considera e analisa a bacia hidrográfica como um imenso reservatório de água, que vai sendo liberada aos cursos d'água de maneira regular ao longo do ano.

Esses mesmos autores destacam que a primeira abordagem, em termos dos pagamentos por SEH, é muito reduzida, pois trata apenas daquilo que chega instantaneamente ao leito do rio, e que a segunda vertente é muito mais interessante para a sociedade. Ao se falar de remunerar o proprietário rural que implementa medidas conservacionistas utiliza-se apenas pela primeira abordagem, quando a segunda é muito mais essencial para a sociedade (GOMES et al., 2003).

Sendo assim, é cada vez mais urgente, portanto, mensurar, avaliar e monitorar o que acontece com a água de precipitação que efetivamente contribui com as águas subterrâneas, desenvolvendo metodologia eficiente de mensuração da “produção de água”, que possibilite a proposta de modelos e formas de remuneração ao proprietário rural mais apropriada.

Da mesma maneira Poggiani (1982), alerta para a necessidade de pesquisas prioritárias sobre infiltração da água e sua percolação, sobre o armazenamento da água e sobre os reflexos das áreas cultivadas sobre a quantidade e qualidade da “água produzida”. O autor ressalta também a necessidade de se acompanhar esses estudos

na evolução de algumas bacias hidrográficas experimentais, analisando as consequências do seu manejo sobre o regime hídrico.

As considerações anteriores evidenciam a importância do desenvolvimento de modelos como o formulado neste trabalho.

2.3.3 Análise de sensibilidade

Para fazer a análise de sensibilidade foram definidos vários cenários nos quais se modificaram o IAF e os coeficientes de interceptação do dossel e dos galhos. Mantendo constantes uma altura da vegetação de 20m, e o método de cálculo da evapotranspiração de Penman-Monteith, em todos os cenários. Utilizaram-se essas variáveis, pois elas são importantes no processo de evapotranspiração e interceptação da precipitação.

Os cenários 1 até 6 mostram os SEH gerados com um IAF de 5,45; um coeficiente de interceptação do dossel de 0,001 e um coeficiente de interceptação dos galhos de 0,002.

Os cenários 7 até 12 mostram os SEH gerados com um IAF de 12; um coeficiente de interceptação do dossel de 0,006 e um coeficiente de interceptação dos galhos de 0,008.

O QUADRO 6 apresenta os cenários e os resultados obtidos nos fluxos dos SEH estudados.

Cenários	Mét. Calc. Evapot.	Descrição do cenário				Serviço de água			Totais de SEH (m³ha⁻¹ano⁻¹)
		Textura Solo		Altura vegetação (m)	Profundidade lençol freático (m)	Superficial	Infiltrada	Armazenada	
	Penman-Montieth	Franco	Argila						
1	X			20	150	137,0	956,0	15147,0	16240,0
2	X			20	25	0,4	1469,0	14191,0	15660,4
3	X			20	5	0,4	6092,0	6103,0	12195,4
4	X			20	150	146,0	1201,0	16263,0	17610,0
5	X			20	25	0,4	1793,0	14865,0	16658,4
6	X			20	5	0,4	6133,0	6485,0	12618,4
7	X			20	150	136,0	1145,0	14682,0	15963,0
8	X			20	25	0,0	1214,0	14028,0	15242,0
9	X			20	5	0,0	5663,0	6103,0	11766,0
10	X			20	150	145,0	1576,0	15603,0	17324,0
11	X			20	25	0,0	1411,0	14819,0	16230,0
12	X			20	5	0,0	5704,0	6485,0	12189,0

Quadro 6 – Quantidades totais de SEH obtidos em cada cenário estudado na análise de sensibilidade (m³ ha⁻¹ ano⁻¹)

Quando analisados os resultados da análise de sensibilidade pode-se concluir que:

i) ao aumentar o IAF a Evapotranspiração potencial (ETp) aumenta e a disponibilidade do recurso hídrico diminui, ii) para a “produção de água” poderia ser mais eficiente árvores com IAF menor, e com coeficientes de interceptação do dossel e dos galhos também menores. Pode observar-se no QUADRO 6 que os cenários 1a até 2c onde esses parâmetros são menores, geraram maiores quantidades totais de fluxos de serviços de água superficial, infiltrada e armazenada iii) com o MOVA poderia se otimizar quais seriam as variáveis que nos ajudariam a garantir uma maior conservação do recurso hídrico baseado nas características das espécies vegetais a serem utilizadas no reflorestamento e iv) o MOVA permite estimar fluxos quantitativos de SEH hídricos, nesse sentido pode auxiliar no monitoramento da provisão destes serviços. Tais informações podem contribuir a uma compensação mais justa, aos proprietários rurais pelos serviços que efetivamente são gerados em suas propriedades por causa do reflorestamento e das outras medidas conservacionistas implementadas nessas áreas. Uma vez identificada a contribuição real da propriedade no fornecimento destes serviços, pode-se orientar a compensação baseada nessa contribuição.

2.3.4 Exemplos de outras avaliações que podem ser realizadas com o MOVA

O MOVA contém 96 parâmetros e, para cada um deles é possível fazer análises de sensibilidade, a fim de avaliar seu comportamento e influência na geração de SEH, a escolha dependerá dos objetivos do usuário do modelo.

A seguir apresenta-se a maneira de exemplo alguns parâmetros analisados para o local de estudo. O tipo de textura do solo e os valores da altura da vegetação e da profundidade do lençol freático são característicos da sub-bacia das Posses.

Os cenários formulados, para o exemplo de aplicação do MOVA na sub-bacia das Posses (figuras 49, 50, 51, 52 e 53) baseiam-se em se tomar um solo com textura franca; uma altura da vegetação de 10m; e uma profundidade do lençol freático de 5m. Foi usado o método indireto de cálculo da evaporação da área de estudo (CHRISTIANSEN, 1968); e o método para estimar a evapotranspiração escolhido foi o de Penman-Monteith.

A FIGURA 49 apresenta o comportamento dos estoques de água superficial, água na zona não saturada e água na zona saturada ao longo do ano. Pode-se perceber que o movimento ascendente das águas subterrâneas alimentando as florestas (caso zona saturada) vai diminuindo e na zona não saturada vai acumulando-se, indicativo de que o volume de água movimentou-se entre estas zonas.

Figura 49 – Estoques de água superficial, zona saturada e zona não saturada

Na FIGURA 50 podem ser verificados o comportamento da evaporação e a transpiração. Igualmente pode-se verificar tanto a disponibilidade da água armazenada no solo para ser utilizada pela floresta, como também o movimento ascendente da água desde a zona saturada até a zona das raízes das plantas, sendo assim um contribuinte no processo da transpiração.

Figura 50 – Variáveis relacionadas ao processo de evapotranspiração

Na FIGURA 51 podem observar a influência que a água das precipitações e que foi interceptada pela vegetação tem nos valores da evaporação. Quando se produzem eventos pluviométricos existe uma resposta clara nas perdas de água por evaporação. Entretanto, o comportamento da transpiração apresenta aumentos e diminuições ao longo do ano, com valores extremos menos pronunciados na época de menos calor (entre os 120 e 260 dias Julianos, época de menores temperaturas isto se traduz numa menor quantidade de água interceptada que será aportada como evaporação na região).

Figura 51 – Valores diários de evaporação, precipitação e transpiração (m)

Na Figura 52 podem observar mais claramente, a relação entre as precipitações e a interceptação de estas pela vegetação.

Figura 52 – Valores diários de interceptação e precipitação (m)

Segundo Medeiros et al. (2005) num esquema de “produção de água”, a precipitação é a primeira variável a ser considerada em qualquer estudo sobre a água

dentro do ciclo hidrológico, pois é a fonte que abastece todos os reservatórios, incluindo o solo e o subsolo.

A capacidade de infiltração do solo é a segunda variável a ser considerada, pois a água precipitada que não fica retida na vegetação, na serrapilheira ou estocada sobre o solo, e que não evaporou antes de atingir o solo, só tem a opção de infiltrar neste ou escoar sobre este. Em infiltrando, constituir-se-á na verdadeira reserva da água que mantém a perenidade de fontes, nascentes e aquíferos (MEDEIROS et al., 2005).

O escoamento superficial, a terceira variável, é dependente da capacidade instantânea de infiltração de água do solo da área estudada. Essa água abastece rapidamente os cursos de água e os reservatórios de superfície os lagos, açudes e barragens. É também a causa energética da erosão hídrica, geológica ou antrópica (MEDEIROS et al., 2005).

A interligação dessas variáveis (precipitação, infiltração e escoamento superficial) torna-se essencialmente fundamental e crítica nas bacias hidrográficas que sofrem restrição hídrica, como é o caso das BH-PCJ, pois, nessas áreas, o plano das bacias hidrográficas deve garantir a minimização das perdas de água e maximizar a eficiência de utilização dos recursos hídricos.

O MOVA permite estudar o comportamento dessas variáveis ao longo do período de simulação de um ano (FIGURA 53), tornando-se assim, num instrumento útil e efetivo para mensurar e monitorar os processos de “produção de água”. Essas informações podem auxiliar aos formuladores dos planos de bacia e aos tomadores de decisões no planejamento das ações e das medidas a serem implementadas.

A FIGURA 53 apresenta o comportamento anual da precipitação que acumula $1,62\text{m ano}^{-1}$; da água infiltrada que acumula $0,76\text{m ano}^{-1}$ e do fluxo superficial/escoamento superficial que acumula $0,3\text{m ano}^{-1}$.

Figura 53 – Comportamento anual da precipitação, infiltração e fluxo superficial/escoamento superficial (m d^{-1})

3 CONCLUSÕES

Usar um modelo baseado em processos, para simular as funções ecossistêmicas que geram SEH apresenta várias vantagens; uma delas é que o modelo permite efetuar projeções para situações onde não existe monitoramento permanente de dados. Outra vantagem é que a construção do modelo através das etapas de conceitualização, formalização e simulação, favoreceu o entendimento dos processos hidrológicos que geram serviços ecossistêmicos hídricos. Esse entendimento possibilitou analisar de que forma a oferta desses serviços depende da combinação de um conjunto de variáveis biofísicas, que podem ser medidas e avaliadas para diferentes locais.

Os modelos baseados em processos utilizam equações que descrevem as relações entre as variáveis de entrada e saída. No desenvolvimento teórico do MOVA tem-se utilizado métodos analíticos que permitem calcular algumas dessas variáveis. Devido à escassez de dados com relação ao local de estudo, em certos casos, alguns desses parâmetros, a opção de se poder calcular analiticamente alguns dos processos mostrou-se muito conveniente. O MOVA embasa-se no modelo hidrológico de balanço de água.

Também é possível usar o modelo para encontrar as variáveis que otimizam um ou vários dos serviços ecossistêmicos avaliados. O modelo pode ser utilizado também para simulação.

É necessário que os valores dos parâmetros utilizados no modelo sejam da área de estudo, neste caso o MOVA foi parametrizado para a sub-bacia das Posses. Entretanto, o modelo deverá ser calibrado, isso significa ajustar o modelo a uma série de dados de entradas e saídas. A calibração supera os limites deste trabalho.

O MOVA desenvolvido no software STELLA, tem a possibilidade de se transformar num modelo espacialmente explícito, ou seja, representar o espaço como uma matriz uniforme de células (tipo raster) e simular os processos que operam em cada uma delas. Esses modelos têm uma estrutura hierárquica onde cada célula representa um sistema que interage com as células adjacentes e que conjuntamente simulam os processos da bacia ou sub-bacia.

Outra vantagem do *software* utilizado na construção do MOVA é sua capacidade modular. Um módulo é um conjunto de fontes de códigos de computador que podem

simular processos de forma independente ou juntar-se a outros de acordo com o interesse de cada usuário. Através desta estrutura é possível que o usuário construa modelos ajustados às suas necessidades particulares, integrando sub-modelos disponíveis numa biblioteca de módulos ou gerando novos componentes quando necessário.

Os conceitos e idéias gerados, nas teorias vinculadas a dinâmica de sistemas e fundamentados na formulação e aplicação de modelos, são elementos que subsidiam a tomada de decisões relacionadas aos projetos de PSH e a gestão dos recursos naturais. Essa forma de aproximação é mais flexível e sistemática para a análise de projetos de PSH. Espera-se que os resultados obtidos com o presente estudo promovam o estudo dos PSE sob um esquema multidisciplinar, transdisciplinar e integral e que auxilie no entendimento do efeito que tem a implementação de práticas de conservação das matas e florestas na provisão de serviços ecossistêmicos hídricos.

A Dinâmica de Sistemas (metodologia usada para o desenvolvimento do MOVA) permitiu expressar mais adequadamente os processos ecossistêmicos fornecedores dos SEH, por intermédio da modelagem, possibilitando perceber mais claramente a complexidade dinâmica das relações entre as partes constitutivas destes processos.

Aplicando o modelo conseguiu-se evidenciar que modificações nos fluxos de SEH em uma sub-bacia hidrográfica podem ser causadas por mudanças no tipo de cobertura vegetal, pela variabilidade climática, geográfica e topográfica, pela textura do solo, entre outros. A troca de uma cobertura vegetal por outra altera os componentes do ciclo hidrológico na sub-bacia hidrográfica alterando necessariamente a geração dos SEH.

Assim, percebe-se que o MOVA é uma ferramenta que possui um elevado potencial de aplicação nas fases de definição de âmbito e de avaliação de alternativas de um processo de planejamento de esquemas de Pagamentos por SEH.

Devido à complexidade dos processos ecossistêmicos envolvidos na geração de serviços ecossistêmicos, é difícil comprovar através de metodologia científica a relação entre uso da terra e fornecimento tais serviços. Não obstante, o presente trabalho tem mostrado a validade da metodologia da dinâmica de sistemas e da modelagem ecológica, como ferramenta muito útil na análise e avaliação deste tipo de problema.

Finalmente é importante reconhecer também que os projetos de pagamentos por serviços ecossistêmicos hídricos, implementados nas bacias PCJ, constituem um avanço muito grande dentro da política ambiental brasileira ao retribuir um benefício aos proprietários das propriedades rurais onde são gerados os serviços ecossistêmicos. Para que esses projetos tenham mais sucesso é importante fazer pesquisas como a desenvolvida neste trabalho que ao abordar a dinâmica própria dos ecossistemas onde se implantam estes projetos, permitam evidenciar qual é o impacto que tem na oferta ambiental e na qualidade e quantidade dos fluxos de serviços ecossistêmicos.

REFERÊNCIAS

ADAMOWICZ, W. Stated preference methods for environmental valuation. In: ANNUAL MEETING OF THE AGRICULTURAL ECONOMICS SOCIETY, 1994, Exeter. **Proceedings...** Exeter: University of Exeter, 1994. p. 77-94.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Programa Produtor de Água**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/produagua>>. Acesso em: 03 jan. 2010.

ALLEN, R.G. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage, 56).

ALTIERI, M.A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, n. 74, p. 19-31, 1999.

ALVARENGA, A.P. **Avaliação inicial da recuperação de mata ciliar em nascentes**. 2004. 175 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Ambiental) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

AMAZONAS, M.C. Valor ambiental em uma perspectiva heterodoxa institucional-ecológica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 34., 2006, Salvador. **Anais...** Salvador, 2006. p. 22-33.

ANDERSON, V.; JONHSON, L. **Systems thinking basics**: from concepts to causal loops. Cambridge: Pegasus, 1997. 132 p.

APPLETON, A.F. **How New York city used an ecosystem services carried out through an urban-rural partnership to preserve the pristine quality of its drinking water and save billions of dollars**. Trabalho apresentado en el encuentro del Forest Trends, Tokyo, November 2002. 56 p.

ARACIL, J. **Introducción a la dinámica de sistemas**. Madrid: Alianza Universidad, 1986. 96 p.

ARONSON, J.; MILTON, S.; BLIGNAUT, J. Restoring natural capital: Definition and Rationale. In: ARONSON, J.; MILTON, S.; BLIGNAUT, J. (Ed.). **Restoring natural capital**: science, business, and practice. Washington: Island Press, 2007. chap. 1, p. 3-8.

AZEVEDO, T.S. **Legislação e geotecnologias na definição das áreas de preservação permanente e das reservas legais**: aplicação à bacia do Ribeirão das Posses, Município de Extrema – MG. 2008. 168 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2008.

AZEVEDO, T.S.; MANZATTO, A.G. Caracterização fitogeográfica de seis bacias hidrográficas localizadas no município de Extrema (MG). In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 7., 2005, Caxambu. **Anais...** Caxambu, 2005. 1 CD-ROM.

AZQUETA. **Introducción a la economía ambiental**. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2002. 87 p.

BACH, N.L.; SAAED, K. Food self-sufficiency in Vietnam: a search for a viable solution. **System Dynamics Review**, Cambridge, n. 8, p. 129-148, 1992.

BAKSHI, R.B. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. **Computers & Chemical Engineering**, New York, v. 2, n. 26, p. 269-282, 2002.

BARBIER, E.B.; HEAL, G.M. Valuing ecosystem services. **The Economists' Voice** 3 (3), article 2. Disponível em: <<http://www.bepress.com/ev/vol3/iss3/art2>>. Acesso em: 05 abr. 2008.

BARBIER, E.B.; ACREMAN, M.; KNOWLER, D. **Valoración económica de los humedales**. Guía para decisores y planificadores. Gland: Oficina de la Convención de Ramsar-UICN, 1997. 116 p.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, Cambridge, n. 12, p. 183-210, 1996.

BASSANEZI, R.C.; FERREIRA JÚNIOR, W.C. **Equações diferenciais com aplicações**. São Paulo: Harbra, 1988. 57p.

BAUMGARTNER, A.; REICHEL, E. **The world water balance**. New York: R. Oldenburg Verlag; Munich: Elsevier Scientific, 1975. 54 p.

BELLIA, V. **Introdução à economia do meio ambiente**. Brasília: IBAMA, 1996. 262 p.

BERTALANFFY, L.V. **Teoría general de los sistemas**. México: Fondo de Cultura Económica, 1976. 158 p.

BINGHAM, G.; BISHOP, R.; BRODY, M.; BROMLEY, D.; CLARK, E.(T); COOPER, W.; COSTANZA, R.; HALE, T.; HAYDEN, G.; KELLERT, S.; NORGAAARD, R.; NORTON, B.; PAYNE, J.; RUSSEL, C.; SUTER, G. Issues in ecosystem valuation: Improving Information for decision making. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 14, p. 73-90, 1997.

BIN-ITHNIN, H. **Spatial analysis of changes in surface water and its effects on the environment due to urbanization: the case of Kuala Lumpur, Malaysia**. 1988. 280 p. Thesis (PhD) - Department of Geography, Pennsylvania State University, University Park, 1988.

BLIGNAUT, J. Restoring natural capital: a reflection on ethics. In: ARONSON, J.; MILTON, S.; BLIGNAUT, J. (Ed.). **Restoring natural capital: science, business, and practice**. Washington: Island Press, 2007. chap. 2, p. 9-16.

BOCKSTAEL, N.E.; FREEMAN III, A.M.; KOPP, R.J.; PORTNEY, P.R.; SMITH, V.K. On measuring economic values for nature. **Environmental & Science Technology**, Easton, n. 34, p. 1384-1389, 2000.

BONALUME, W.L. **Desenvolvimento insustentável: imprecisão e ambigüidade nas ciências ambientais**. São Paulo, 2009. 124 p.

BRASIL. Leis, Decretos, etc. **Lei no 9.433/1997**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/CCivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 07 jun. 2009.

_____. **LEI No 9.985/2000**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/CCivil_03/Leis/L9433.htm> Acesso em: 07jun. 2009.

BROWN, M.T.; HERENDEEN, R.A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 19, p. 219-235, 1996.

BRUDTLAND, G.H. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1987. 430 p.

BRUIJNZEEL, L.A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for trees? **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 104, p.185-228, 2004.

CAMACHO, M.A. **Pago por servicios ambientales**. Octavo informe sobre el estado de la nación en desarrollo humano sostenible. San Jose: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2002. 112 p.

CANADELL, J.R.B.; JACKSON, J.R.; EHLERINGER, H.A.; MOONEY O.E.; SALA, E; SCHULZE, E.D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, Berlin, n. 108, p. 583-585, 1996.

CAPRA, F. **The web of life**. New York: Anchor, 1996. 347p.

_____. **As conexões ocultas**. São Paulo: IDESA, 2003.12 p. (Palestra)

CARDOSO, C.A.; DIAS, H.C.T.; MARTINS, S. V.; SOARES, C. P. B. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 249-256, 2006.

CASTRO, P.S. **Influência da cobertura florestal na qualidade da água em duas bacias hidrográficas na região de Viçosa, MG**. 1980. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1980.

_____. Técnicas de conservação de nascentes. **Ação Ambiental**, Viçosa, v. 4, n. 20, p. 24-26, 2001.

CELLERI, R. Estado del conocimiento técnico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes; servicios ambientales para la conservación de los recursos hídricos: lecciones desde los Andes. In: CONDESAN, 2009, Equador. **Resumos...** Equador: CONDESAN Regional. 2009. 1 CD-ROM.

CENTRO TECNOLÓGICO DA FUNDAÇÃO PAULISTA -. **Relatório de Situação dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - 1999** – Lins: CETEC, 2000. 225 p.

CHAVES, H.M.L.; BRAGA JR., B.; DOMINGUES, A.F.; SANTOS, D.G. Quantificação dos benefícios e compensações do "Programa Produtor de Água" (ANA): I. Teoria. **Revista da Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 5-14, 2004a.

_____. Quantificação dos benefícios e compensações do "Programa do Produtor de Água" (ANA): II. Aplicação da metodologia. **Revista da Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 9, n. 3, p.15-31, 2004b.

CHENG, G.W. Forest change: hydrological effects in the upper Yangtze river valley. **Ambio**, Stockholm, n. 28, p. 457–459, 1999.

CHOW, V.T. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill Book, 1964. 572 p.

CHRISTIANSEN, J.E. Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. **Journal Irrigation and Drainage Division**, New York, n. 94, p. 243-265, 1968.

CLAPP, R.; HORNBERGER, G. Empirical equations for some soil hydraulic properties, **Water Resources**, New York, n. 14, p. 601-604, 1978.

CLAASSEN, R. **Agri-environmental policy at the crossroads**: guideposts on a changing landscape. Washington: USDA, ERS, 2001. 67 p. (Report, 794).

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRAFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI e JUNDAÍ – CBH-PCJ. **Atas CT-RURAL**. Disponíveis em: <<https://www.comitepcj.sp.gov.br>>. Acesso em: 20 maio 2007.

_____. **Municípios das BH-PCJ**. Disponíveis em: <<https://www.comitepcj.sp.gov.br>> Acesso em: 15 out. 2010.

COSGROVE, W.J.; RIJSBERMAN, F.R. **World water vision for the world water council**. London: Earthscan Publications, 2000.120 p.

COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J.A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 34, p. 4-11, 2003.

COSTANZA, R. (Ed.). **Ecological economics**: the science and management of sustainability. New York: Columbia University Press, 1994. 525 p.

_____. Social goals and the valuation of ecosystem services. **Ecosystems**, New York, n. 3, p. 4-10, 2000.

COSTANZA, R.; RUTH, M. Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus. **Environmental Management**, New York, v. 22, n. 2, p. 183-195, 1998.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.S.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.V.; PARUELO, J.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, London, n. 387, p. 253-260, 1997.

_____. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 25, p. 67-72, 1998.

CRISTOFELETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgar Blücher, 1981. v. 1: O canal fluvial, 313 p.

CUNHA, S.B.; GUERRA, A.T.S.B. (Org.). **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996. 345 p.

D'ALTÉRIO, C.F.; VEIGA NETO, F.C.; CARVALHO, G.; VALLADARES, G. **O Comitê para Integração da Bacia do Rio Paraíba do Sul - CEIVAP à Luz da Legislação de Recursos Hídricos: Análise Comparativa das Leis Estaduais do RJ, SP E MG**. 2000. Trabalho apresentado como requisito parcial para aprovação na Disciplina Gestão Ambiental, PPE – COPPE. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. 143 p.

DALE, V.H. **Ecological modeling for resource management**. New York: Springer-Verlag, 2003. 328 p.

DAILY, G., **Nature's services**: societal dependence on natural ecosystem. Washington: Island Press, 1997. 350 p.

DAILY, G.C.; SÖDERQVIST, T.; ANIYAR, S.; ARROW, K.; DASGUPTA, P.; EHRLICH, P.R.; FOLKE, C.; JANSSON, AM.; JANSSON, B-O.; KAUTSKY, N.; LEVIN, S.; LUBCHENCO, J.; MÄLER, K-G.; SIMPSON, D.; STARRETT, D.; TILMAN, D.; WALKER, B. The Value of Nature and Nature of Value. **Science**, London, n. 289, p.395-396, July 2000.

DA SILVA, M.A.; LIMA, G.C.; NAVES SILVA, M.L.; DE FREITAS, D.A.F.; OLIVEIRA, A.H.; REIS DOS SANTOS, W. Jr.; PEREIRA, P.H.; DOS SANTOS, D.G.; VEIGA, F. Levantamento de solos e diagnóstico da degradação do solo e da água em função do uso. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 17., 2008, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2008. 1 CD-ROM.

DAVIDE, A.C.; PINTO, L.V.A.; MONNERAT, P.F.; BOTELHO, S.A. **Nascente: o verdadeiro tesouro da propriedade rural – o que fazer para conservar as nascentes nas propriedades rurais.** Lavras: UFLA, CEMIG, 2002. 20 p.

DE FREITAS, D.A.F.; OLIVEIRA, A.H.; NAVES SILVA, M.L.; DA SILVA, M.A.; LIMA, G.C.; REIS DOS SANTOS, W. Jr.; PEREIRA, P.H.; DOS SANTOS, D.G.; VEIGA, F. levantamento conservacionista e classes de capacidade de uso da terra na sub-bacia das posses, no município de extrema, região sul do estado de minas gerais. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 2008, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2008. 1 CD-ROM.

DeFRIES, R.; BOUNOUA, L. Consequences of land use change for ecosystem services: a future unlike the past. **GeoJournal**, New York, v. 61, p. 345–351, 2004.

DE GROOT, R.S.; WILSON, M.A.; BOUMANS, R.M.J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 41, p. 393–408, 2002.

DENARDI, R.A.; HENDERIKX, E.; BORGES, D.; BIANCHINI, V. **Fatores que afetam o desenvolvimento local em pequenos municípios do Paraná.** Disponível em: <<http://www.cria.org.br>>. Acesso em: 07 mar. 2008.

DIAS, L.E. Recuperação de áreas degradadas. In: ENCONTRO DE PRESERVAÇÃO DE MANANCIAS DA ZONA DA MATA MINEIRA, 2003, Viçosa. **Anais...** Viçosa: ABES; UFV, DEA, 2003. p. 225-268.

DOMINICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. **Physical and chemical hydrogeology.** New York: John Wiley, 1990. 236 p.

DUVIGNEAUD, P. **A síntese ecológica: populações, comunidades e ecossistemas.** Lisboa: Socicultur, 1974. 165 p.

DUVOISIN, I.A. **Uma proposta metodológica para o ensino de equações diferenciais utilizando STELLA.** Porto Alegre: Fundação Universidade Federal do Rio Grande/Revista eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, 2000. 13 p.

EHLERS, E. **Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma.** 2. ed. Guaíba, 1999. 157p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 2006. 94 p.

EQUIHUA, M.; PÉREZ-MAQUEO, O. **Modelación matemática e conservación**. Disponível em: <http://cbc.amnh.org/ncep/us/author_info.php>. Acesso em: 10 dez. 2007.

ESTADOS UNIDOS. Department Of Agriculture. **Soil survey manual**. Washington: USDA, Soil Survey Division Staff, 1993. (Handbook, 18).

EXTREMA (Cidade). Departamento de Meio Ambiente. **Projeto água é vida: diagnóstico sócio ambiental em sub bacias hidrográficas no município de Extrema: 2005a**. Disponível em: <<http://www.extrema.mg.gov.br/meioambiente/index.php>>. Acesso em: 01 fev 2006.

_____. **Projeto Conservador das Águas Lei Municipal 2.001/05: 2005b**. Disponível em: <<http://www.camaraextrema.mg.gov.br/html/legislacao>>. Acesso em: 01 fev. 2006.

FAO. **Sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas**. Arequipa: Foro Regional, organizado por la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 2004.

FARLEY, J.; DALY, H. **Ecological economics: principles and application**. Washington: Island Press, 2003. 454 p.

FARLEY, J.; GADDIS, E. Restoring natural capital: An ecological economics assessment. In: ARONSON, J.; MILTON, S.; BLIGNAUT, J. (Ed.). **Restoring natural capital: science, business, and practice**. Washington: Island Press. 2007. chap. 3, p. 17-27.

FERNANDES, A. **Fitogeografia brasileira**. Fortaleza: Multigraf, 1998. 340 p.

FERRACIOLI, L.; CAMILETTI, G.G. **Introdução ao ambiente de modelagem computacional STELLA**. Série Modelos, 01/98, Vitória: Publicação Interna do Model@b/UFES., 1998. 35 p.

FITZ, H.C.; DE BELLEVEU, E.; COSTANZA, R.; BOUMANS, R.; MAXWELL, T.; WAINGNER, L.; SKLAR, F. Development of a general ecosystem model for range of scales and ecosystems. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 88, n. 1/3, p. 263-295, 1996.

FORD, A. Testing snare river explorer. **System Dynamics Review**, Cambridge, n. 12, p. 305-329, 1996.

_____. **Modeling the environment: an introduction to system dynamics modeling of environmental systems**. Washington: Island Press, 1999. 401 p.

FORRESTER, J.W. **Industrial dynamics**. Portland: Productivity Press, 1961. 464 p.

_____. **World dynamics**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971. 142 p.

_____. **World dynamics**. 2nd .ed. Cambridge: Wright-Allen Press, 1973. 380 p.

_____. Information sources for modeling the national economy. **Journal of the American Statistical Association**, New York, v. 75, n. 371, p. 555-566, 1980.

_____. Policies, decisions and information sources for modeling. In: MORECROFT, J.D.W.; STERMAN, J.D. (Ed.). **Modeling for learning organizations**. Portland: Productivity Press, 1994.

FREIRE, A.G. **Águas do Jequitinhonha**. 2001. 109 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

GATTO, M.; DE LEO, G. A.. Pricing biodiversity and ecosystem services: the never-ending story. **BioScience**, Washington, v. 4, n. 50, p. 347-355, 2000.

GESUALDI, F. Giù lê mani daí servize pubblici: il caso dell acqua privatizzata. In: CIPSI (Org.). **Acqua bene comune dell umanità: probleme e prospettive**. Udine: CeVI, 2001.

GLEICK, P.H. **Water in crisis**. New York: Oxford University Press, 1993. 420 p.

_____. **The world's water 1998-1999**: the biennial report on freshwater resources. Washington: Island Press, 1998. 180 p.

_____. **The world's water 2000-2001**: the biennial report on freshwater resources. Washington: Island Press, 2000. 170p.

GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrográficas: Conceitos básicos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 3-14.

GONÇALVES, E.; FERRACIOLI, L. **A modelagem computacional quantitativa no estudo do resfriamento da água**: um estudo exploratório com estudantes do ensino médio. Vitória: CEFET-ES; UFES, Depto. Física, 2006. 35 p.

GOMES, A.G.; VARRIALE, M.C. **Modelagem de ecossistemas**: uma introdução. Santa Maria: Editora UFSM, 2004. 503 p.

GOMES, M.A.; BORGES, S.J.; FRANCO, I.C.; CORRÊA, J.L.P. Tecnologias apropriadas à revitalização da capacidade de produção de água de mananciais. In: ASSEMAE, 33., 2003, Santo André, **Anais...** Santo André, 2003. 1 CD-ROM.

GRIFFITH, J.J. Recuperar áreas degradadas é zelar pelas futuras gerações. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 210, p. 1-2, 2001.

GRIFFITH, J.J.; TOY, T.J. Linking physical and social systems for improving disturbed-land reclamation. In: NATIONAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF MINING

AND RECLAMATION, 2005, Breckenridge. **Proceedings...** Montavesta; Lexington: ASMR, 2005. p. 19-23.

GUNTER, P. **Upsizing**: como gerar mais renda, criar mais postos de trabalho e eliminar a poluição. Porto Alegre: Fundação Zeri Brasil; L&PM, 1999. 356 p.

HAEFNER, J.W. **Modeling biological systems**: principles and applications. New York: Chapman & Hall, 1996. 473 p.

HAMILTON, L.; CASSELS, D. Hidrology overview. In: DUDLEY, N.; STOLTON, S. (Ed.). **Running pure**: the importance of forest protected areas to drinking water. Washington: World Bank; WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use, 2003. p. 58-62.

HAMILTON, M.S. Estimating lengths and orders of delays in system dynamics models. In: SANDERS, J. (Ed.). **Elements of the. system dynamics method**. Cambridge: MIT Press, 1980. p. 162-183.

HARE, M.; LETCHER, R.A. ; JAKEMAN, Participatory natural resources management: a comparison of four case studies. **Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society- IEMSS**, v. 1, p.73-78, 2002.

HARRISON, M.I.; SHIROM, A. **Organizational diagnosis and assessment**: bridging theory and practice. Thousand Oaks: Sage, 1999. 486 p.

HAU, J.L.; BAKSHI, B.R. **Expanding exergy analysis to include ecological products and services**. Disponível em: <<http://www.che.eng.ohio-state.edu>>. Acesso em: 10 jun. 2007.

HAWKENS, P.; LOVINS, A.; LOVINS, L.H. **Capitalismo natural**. São Paulo: Cultrix, 1999. 358 p.

HEAT, R. **Hidrologia básica de águas subterrâneas**. Washington: United States Geological Survey Water Supply, 2009. (Paper, 2220).

HELLIWELL, D.R. Valuation of wildlife resources. **Regional Studies**, Cambridge, n. 3, p.41-49, 1969.

HERENDEEN, R.A. Monetary-costing environmental services: nothing is lost, something is gained. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 25, p. 29-30, 1988.

HOEFFEL, J.L.M. Área de Proteção Ambiental (APA) Fernão Dias/MG – Transformações socioambientais na bacia hidrográfica do rio Jaguary. **Climep**, Rio Claro, v. 3, n.1, p. 30-60, 2008.

HURTUBIA, J. Ecología y desarrollo: evolución y perspectivas del pensamiento ecológico. In: _____. **Estilos de desarrollo y medio ambiente**. México: Fondo de Cultura Económica, 1980. p.234-248.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de Minas Gerais**. Rio de Janeiro, 1993. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/coleção_digital_publicacoes.php>. Acesso: 10 dez.2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Mapa climático de Brasil**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 03 jan. 2009.

INTERNATIONAL FEDERATION OF INSTITUTES FOR ADVANCED STUDY. **Energy analysis workshop on methodology and conventions**. Stockholm, 1974.

THE INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE. **Impact**. Disponível em: <<http://www.ifpri.cgiar.org/themes/impact.htm>>. Acesso em: 01 jul 2005.

THE INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE. **Podium**. Disponível em: <<http://www.cgiar.org/iwmi/software/podium.htm>>. Acesso em: 01 jul.2009.

IRRIGART. **Relatório de situação dos recursos hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá**: Piracicaba – 2000 a 2003. Piracicaba, 2005. 457 p.

JAKEMAN, A.J.; HORNBERGER, G.M. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. **Water Resources**, New York, n. 29, p. 2637–2649, 1993.

JARVIS, P.G.; McNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances of the Ecological Resources**, New York, n. 15, p. 1-49, 1986.

JOHNSON, N.; PERROT-MAITRE, D. Market-Based Instruments and Watershed Management: Overview. 2000. In: WORKSHOP DEVELOPING MARKETS FOR ENVIRONMENTAL SERVICES OF FORESTS, 2000.Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: British Columbia, 2000.

JORGENSEN, S.E. **Integration of ecosystem theories**: a pattern. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992. 165 p.

KAKADE, B.; KULKARNI, H.; BUTTERWORTH, J. Watersheds and water services. In: WEDC CONFERENCE, 28., 2002, Calcutta. **Proceedings...** Calcutta, 2002.

KIERSCH, B. Land use impacts on water resources. In: **Land-water linkages in rural watersheds**. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agl/watershed>>. Acesso em: 01 jun. 2009.

KING, R.T. Wildlife and man. **NY Conservationist**, New York, v. 20, n .6, p. 8–11, 1996.

KORZOUN, V.I. **World water balance and water resources of the earth**. Leningrad: Hidrometroizdat, 1974. 638 p.

_____. **World water balance and water resources of the earth**. New York: UNESCO, 1978. 663 p.

KRCHNAK, K. **Watershed valuation as a tool for biodiversity conservation: lessons learned from conservancy projects**. Arlington: The Nature Conservancy, 2007. 48 p.

LANDELL-MILLS, N.; PORRAS, I. **Silver bullet or fools' gold?: A global review of markets for forest environmental services and their impacts on the poor**. London: Institute for Environment and Development, 2002. 275 p.

LEMOES, R.C.; SANTOS, R.D.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2005. 92 p.

LIMA, G.C.; DE FREITAS, D.A.F.; SILVA, M.L.N.; OLIVEIRA, A.H.; DA SILVA, M.A.; PEREIRA, P.H.; DOS SANTOS, D.G.; VEIGA, F. Potencialidades de uso do solo e recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema, MG. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 2008, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2008. 1 CD-ROM.

LOTKA, A.J. **Elements of physical biology**. Baltimore: Williams & Williams, 1925. 135 p.

LOUVIERE, J.J. **Relating stated preference measures and models to choices in real markets**. Herndon: Paper prepared for the US Department of Energy and Environmental Protection Agency workshop "Using contingent valuation to measure non-markets values", 1994. 68 p.

L'VOVICH, M. **World water resources and their future**. Chelsea: AGU, 1979. 285 p.

MASHAYEKHI, A.N. Rangelands destruction under population growth: the case of Iran. **System Dynamics Review**, Cambridge, n. 6, p. 167-193, 1993.

MAY, P.H. Economia ecológica e o desenvolvimento equitativo no Brasil. In: MAY, P.H. (Ed.) **Economia ecológica: aplicações no Brasil**. Rio de Janeiro: Campus, 1995. cap. 1, p. 1-20.

MAYRAND, K.; PAQUIN, M. **Pagos por servicios ambientales: estudio y evaluación de esquemas vigentes**. Montreal: Unisfera, 2004. 187 p.

MEADOWS, D.H.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. **Dynamics of growth in a finite world**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1974. 670 p.

_____. **Groping in the dark**. New York: John Wiley, 1982. 250 p.

_____. **Beyond the limits**. Toronto: McClelland & Stewart, 1992. 350 p.

MEDEIROS, J.D.F.; SANTOS, N.C.F.; GUEDES, F.X.; SANTOS, M.F. **Análise da precipitação e do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu-RN**. Natal: EMPARN, 2005. 32 p.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystem and human well-being: a framework for assessment**. Washington: Island Press, 2003. 245 p.

_____. **Ecosystem and human well-being**. Washington: Synthesis Island Press, 2005. 285 p.

MOREIRA, J.R. **Agricultura familiar: processos sociais e competitividade**. Rio de Janeiro: Mauad; Seropédica, UFRRJ, CPDA, 1999. 90 p. (Mimeografado).

MOSTER, C. **Avaliação hidrológica da zona riparia através de análise da água subterrânea ao longo das vertentes de uma microbacia experimental**. 2007. 82 p.: Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MUNDA, G. **Teoría de la evaluación multicriterio: una breve perspectiva**. Disponível em: <<http://www.ecoeco.org>>. Acesso em: 01 jun. 2007.

NALLURI, C.; JUDY, N.D. Factors affecting roughness in coefficient in vegetated channels. In: YEN, B.C. (Ed.). **Channel flow and catchment runoff: Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula**. Charlottesville: University of Virginia, 1989.

NARDELLI, A.M.B.; GRIFFITH, J.J. **Introdução ao sistema de gestão ambiental**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Núcleo de Gestão Integrada, 2000. 60 p. (Apostila de curso).

NEELAMKAVIL, F. **Computer simulation and modeling**. New York: John Wiley, 1987. 589 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; KING, K.W. **Soil and Water Assessment Tool (SWAT): theoretical documentation, version 2000**. College Station: Texas Water Resources Institute Report TR-191, 2002. 267 p.

THE NETHERLANDS NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT. **Targets**. Disponível em: <<http://www.baltzer.nl>>. Acesso em: 01 jul. 2009.

NIKOLOV, N.T.; ZELLER, K.F. A solar radiation algorithm for ecosystem dynamic models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, n. 61, p. 149-168, 1992.

NORBERG, J. Linking Nature's services to ecosystems: some general ecological concepts. **Ecological Economics**, Amsterdam, n. 29, p.183-202, 1999.

NOVOTNY, V.; OLEM, H. **Water quality**: prevention, identification and management of diffuse pollution. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994. 154 p.

NUNES, A.P. **Código de águas**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2001. 549 p.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434 p.

_____. **Environmental accounting**: EMERGY and environmental decision making. New York:Wiley, 1996. 370 p.

ORELLANA GONZÁLEZ, A.M.G. **Sostenibilidad de los recursos hídricos en São Miguel do Anta, Minas Gerais**: un enfoque de dinámica de sistemas. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PAGIOLA, S. Paying for water services in Central America: Learning from Costa Rica. In: PAGIOLA, S.; BISHOP, J.; LANDELL-MILLS, N. (Ed.). **Selling forest environmental services**: market-based mechanisms for conservation and development. London: Earthscan, 2002. chap. 3, p. 37-61.

PAGIOLA, S. ;BISHOP, J ;LANDELL-MILLIS, N. **La venta de servicios ambientales forestales**. México: Instituto Nacional de Ecología, 2003. 87 p.

PAULA LIMA, W. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrograficas**. 2. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. 245p.

PEARCE, D.W.; TURNER, R.K. **Economics of natural resources and the environment**. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1989. 378 p.

PENTEADO, H. **Ecoeconomia**: uma nova abordagem. São Paulo: Lazuli, 2005. 239 p.

PÉREZ-MAQUEO, O.; EQUIHUA, M.; HERNÁNDEZ E BENÍTEZ , G. Visual Programming Languages as a tool to identify and communicate the effects of a development project evaluated by means of an environmental impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, New York, n. 21, p. 291-306, 2001.

PETRELLA, R. Per salvare l'acqua viva. In: CIPSI (Org.). **Acqua bene comune dell'umanità**: probleme e prospettive. Udine, CeVI, 2001.

PETRIK, S., ASCE, A.M.; III, B. Analysis of flow through vegetation. **Journal of Hydraulic**, New York, v. HY7, p. 871-883, 1975.

PIDD, M. **Tools for thinking**: modeling in management science. Rexdale: Wiley, 1996. 350 p.

PINTO, L.V.A. **Caracterização física da sub-bacia do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e proposta de recuperação de suas nascentes**. 2003. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1978. 279 p.

POGGIANI, F. O reflorestamento no Nordeste Brasileiro: conseqüências ecológicas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 3, n. 10, p. 85-98, 1982.

PORTELA, R.; RADEMARCHER, I. A dynamic model f patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 143, n. 1/2, p. 115-146, 2001.

POST, D.; JAKEMAN, A.J. Relationships between catchment attributes and hydrological response characteristics in small Australian mountain ash catchments. **Hydrological Processes**, Chinchester, v. 10, n. 6, p. 877-892, 1996.

POSTEL, S.L.; THOMPSON JR., B.H., Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services. **Natural Resources Forum**, New York, v. 29, p. 98-108, 2005.

POZZEBON, E.J. **Simulação de escoamento em microbacia hidrográfica utilizando sistemas de informações geográficas e de modelagem hidrológica**. 2000. 234 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

PREFEITURA MUNICIPAL DE EXTREMA. **Projeto “Conservador das Águas”**. Extrema: Prefeitura Municipal, 2008.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1994. 65 p.

RANZINI, M.; RIGHETTO, A.M.; LIMA, W.P.; GUANDIQUE, M.E.G.; ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V. Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 108-119, 2004.

RANZINI, M. **Balanço hídrico, ciclagem geoquímica de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com *Eucalyptus saligna* Smith, no vale do Paraíba, SP**. 1990. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK D.L.; MILLER, N. Green-ampt infiltration parameters from soils data. **Journal of Hydraulic Engineering ASCE**, New York, v. 109, n. 1 p. 62-70, 1983.

REVENGA, C.; MURRAY, S.; ABRAMOVITZ, J.; HAMMOND, A. **Watersheds of the World**. Washington: World Resources Institute and Worldwatch Institute, 1998. 475 p.

REUNIÃO CONJUNTA DA CT-PL E CT-PB, 2., 2006a, Campinas. **Ata...** Piracicaba: Comitê PCJ, 2006. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br>>. Acesso em: 03 nov. 2007.

REUNIÃO ORDINÁRIA DA CT-RURAL, 18., 2007, Piracicaba. **Ata...** Piracicaba: Comitê PCJ, 2007. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br>>. Acesso em: 11 nov. 2007.

REUNIÃO ORDINÁRIA DA CT-RURAL, 12., 2006, Campinas. **Ata...** Piracicaba: Comitê PCJ, 2006. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br>>. Acesso em: 11 nov. 2007

REYES, E.; COSTANZA, R.; WAGNER, L.; DEVELLEVUE, ; BOCKSTAEL, N. Integrated ecological economics regional modelling for sustainable development. In: FAUCHEUX, S.; PEARCE, D. E PROOPS, J.L.R. **Models of sustainable development**. Cheltenham: Bookfield, Us, Edward Elgar, 1996.

RICHMOND, B. **An academic user's guide to STELLA**. High Performance System, In Lime. 1987. 163p.

RICHARDSON, G.P. System dynamics: simulation for policy analysis from a feedback perspective. In: _____. **Modeling for management: Qualitative simulation modeling and analysis**. New York: Springer Verlag, 1991. p. 144-169.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: USP, EESC, 1998. 840 p.

ROBERTS, J.O.M.; CABRAL, R.; de COSTA, J.P.; McWILLIAM, A.L.C. ; de SÁ, T.D.A overview of the leaf area index and physiological measurements during Abracos in JH.C. GASH, C.A. NOBRE, J.M ROBERTS; VICTORIA, R. L. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. John Willey, 1996. p. 287-307.

ROCHA, J.S.M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 1981. 345 p.

ROMEIRO, A.R. **Meio ambiente e dinâmica de inovações na agricultura**. São Paulo: Annablume; FAPESP, 1998. 277 p.

ROSA, H.; KANDEL, S.; DIMAS, L. **Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales: lecciones de las américas y temas críticos para fortalecer estrategias comunitarias**. El Salvador: Prisma, 2003. 175 p.

ROSMAN, P.C.C. **Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental**. Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Hídricos & Meio Ambiente/Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica PENO-COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. 161 p.

RUNNING, S.W.; HUNT, E.R. Generalization of a forest ecosystem process model for the other biomes, BIOME-EGC, and a application for global scale models. In: _____. **Scaling physiological processes: leaf to globe**. New York: Academic Press, 1993.

RUTH, M.; HANNON, B. **Modeling dynamic economic systems**. New York: Springer-Verlag, 1994. 339 p.

RYKIEL, E.J. Testing ecological models. The meaning of validation. **Ecological Modelling**, Amsterdam, n. 90, p. 229-244, 1996.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2000. 167 p.

SAEED, K. **Development planning and policy design: a system dynamics approach**. VT USA: Brookfield, 1994. 254 p.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A.M.G. Water resources assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiaí River Basins: a dynamic systems approach. **Water Resources Management**, New york, v. 24, p. 761-773, 2010.

SANTOS, D.G. **Proposta de experiência piloto do Programa Produtor de Água**. 19ª Reunião Ordinária da Câmara Técnica de Planejamento. Prefeitura Municipal de Extrema Oficina Ambiental, MG. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/CT-PL/PL-Atas.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2007.

SANTOS, M. O espaço e os seus elementos: questões de método. **Revista Geografia e Ensino**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 19-30, 1982.

SAXTON, K.E.; McGUINNESS. Evapotranspiration. In: HANN, C.T.; JOHNSON, H.P. BRAKENSIEK, D.L. (Ed.). **Hydrological modeling of small watersheds**. St. Joseph: ASAE, 1982. p. 229-273. (ASAE Monograph, 5).

SCURLOCK, J.M.O.; ASNER, G.P.; GOWER, S.T. **Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932–2000**. ORNL Technical Memorandum ORNL/TM-2001/268. Oak Ridge: National Laboratory, 2001. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge>>. Acesso em: 01 jun. 2010.

SENGE, P.M. **A quinta disciplina: arte e prática da organização que aprende**. São Paulo: Best Seller, 1990. 441 p.

_____. **La quinta disciplina**. Madrid: Editorial Granica, 1995. 425 p.

_____. **La quinta disciplina en la práctica**. Madrid: Editorial Granica, 1997. 275 p.

SENGE, P.M.; STERMAN, J.D. **System thinking and organizational learning**: acting locally and thinking globally in the organization of the future. Boston: MIT Press, 1992. 214 p.

SHIKLOMANOV, I. **Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world**. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 1997. 186 p.

_____. Appraisal and assessment of world water resources. **Water International**, London, v. 25, n. 1, p. 11-32, 2000.

SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation. In: MAIDMENT, D.R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.

SIKKA, A.K.; SAMRA, J.S.; SHARDA, V.N.; SAMRAJ, P.; LAKSHMANAN, V. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globules*) in Nilgiris watersheds of South India. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 270, p. 12-26, 2003.

SILVA, D.D. Noções de recursos hídricos. In: ENCONTRO DE PRESERVAÇÃO DE MANANCIAIS DA ZONA DA MATA MINEIRA, 3., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: ABES; UFV, DEA, 2002. p. 226-269.

SIMONOVIC, S. Tools for water management: one view of the future. **Water International**, London, v. 25, n. 1, p. 76-88, Mar. 2000.

_____. World water dynamics: global modeling of water resources. **Journal of Environmental Management**, London, n. 6, p. 249-267, 2002.

SIMONOVIC, S.; FAHMY, H. A new modeling approach for water resources policy analysis. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 1, p. 295-304, 1999.

SIMONOVIC, S.; FAHMY, H.; EL-SHORBAGY, A. The use of object oriented modeling for water resources planning in Egypt. **Water Resources Management**, New York, n. 11, p. 243-261, 1997.

SOUZA, M.N. **Ecologia e manejo de ecossistemas**. Apostila da disciplina ecologia e manejo de ecossistemas do curso técnico em meio ambiente. Rio Pomba: CEFET, 2008. 185 p. (Caderno Didático, 16).

STELLA. **Introduction to systems thinking**. NH: High Performance Systems, 2001. 165 p.

STERMAN, J.D. **Business dynamics**: systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin MacGraw-Hill, 2000. 982 p.

THE STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE. **Polestar**. Disponível em: <<http://www.seib.org/polestar/psbro.htm>>. Acesso em: 01 jul. 2009.

THE STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE AND THE BOSTON TELLUS INSTITUTE. **Weap**. Disponível em: <<http://www.seib.org/weap/weapbro.htm>>. Acesso em: 01 jul. 2009.

THE STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE AND THE KASSEL UNIVERSITY – USF. **Watergap**. Disponível em: <http://www.seib.org/watergap/waterpbro.htm>>. Acesso em: 01 jul.2009.

TANGTHAM, N.; SUTTHIPIBUL, V. The effects of diminishing forest areas on rainfall amount and distribution in Northeastern Thailand. In: KASETSART UNIVERSITY CONFERENCE, 1989. **Proceedings...** Kasetsart University, 1989.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geografic Review**, Washington, n. 38, p. 55-94, 1948.

TOGNETTI, L.S.; MENDOZA, G.; SOUTHGATE, D.; AYLWARD, B.; GARCÍA, L. Evaluación de la efectividad de pagos por servicios ambientales en las cuencas hidrologicas. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS, 3., 2003. Arequipa. Arequipa: Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales 2003.

VAN DEN BELT, M. **Mediated modeling**: a system dynamics approach to environmental consensus building. Washington: Island Press, 2004.

VAN DER WEERT, R. **Hydrological Conditions in Indonesia**. Jakarta: Delft Hydraulics, 1994.

VEIGA NETO, F.C. **A construção dos mercados de serviços ambientais e suas implicações para o desenvolvimento sustentável no Brasil**. 2008. 298 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade) – Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VILLA, F.; VOINOV, A.; FITZ, C.; COSTANZA, R. Calibration of large spatial models: a multistage, multiobjective optimization technique. In: COSTANZA, R.; VOINOV, A. (Ed.) **Landscape simulation modeling** : a spatially explicit, dynamic approach. New York: Springer, 2004. p. 47-116.

VILLELA, P.R.C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. In: SEMANA ACADÊMICA DA GESTÃO DO AGRONEGÓCI, 2., 2007, Viçosa. Viçosa: UFV, DER, 2007.

VOINOV, A. **Systems science and modeling for ecological economics**. London: Elsevier, 2008. 287p.

VOINOV, A.; FITZ, C.; BOUMANS, M.; ROELOF, J.; COSTANZA, R. Modular ecosystem modeling. In: COSTANZA, R.; VOINOV, A. (Ed.). **Landscape simulation modeling: a spatially explicit, dynamic approach**. New York: Springer, 2004. p. 43-76.

VÖRÖSMARTY, C.; LÉVÊQUE, C.; REVENGA, C. Fresh water. In: HASSAN, R.; SCHOLLES, R.; ASH, N. (Ed.). **Ecosystems and human well-being: current status and trends**. Washington: Island Press, 2005. v. 1, chap.7. (Millenium Ecosystem Assessment Series).

WÄTZOLD, F.; DRECHSLER, M.; ARMSTRONG, C.W.; BAUMGÄRTNER, S.; GRIMM, V.; HUTH, A.; PERRINGS, C.; POSSINGHAM, H.P.; SHOGREN, J.F.; SKONHOFT, A.; VERBOOM-VASILJEV, J.; WISSEL, C. Ecological-economic modeling for biodiversity management: potential, pitfalls, and prospects. **Conservation Biology**, Boston, v. 20, n. 4, p. 1034-1041, 2006.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. New York: Oxford University Press, 1987. 457 p.

WEBB, T.J. Forest cover-rainfall relationships in a biodiversity hotspot: the atlantic forest of Brazil **Ecological Applications**, Tempe, v. 15, n. 6, p. 1968-1983, 2005.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006: um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2007. 67 p.

WU, J.; BARLAS, Y.; VANKAT, J.L. Effect of patch connectivity and arrangement on animal metapopulation dynamics: a simulation study. **Ecological Modeling**, Amsterdam, n. 65, p. 221-254, 1993.

WUNDER, S. **Payments for environmental services: Some nuts and bolts**. Jakarta: Center for International Forestry Research, 2005. 24 p. (CIFOR Occasional Paper, 42).

_____. The efficiency of payments for environmental services in tropical conservation. **Conservation Biology**, Boston, v. 3, n. 1, p. 48–58, 2007.

ZOLÍN, C. A. **Análise e otimização de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG): o caso do município de Extrema, MG**. 2010. 128 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ANEXOS

Anexo A – Descrição dos parâmetros do MOVA

Estoques:

1. **Água superficial**= lamina de água sobre a superfície do sedimento. Geralmente esta constituída pela água dos rios e as depressões. Pois o modelo assume que não existe água superficial sobre a zona não saturada. O fluxo de água ocorrerá só quando o solo este saturado.o valor inicial deste estoque corresponde ao do converte-dor que esta associado.
2. **Serviço água armazenada** = zona saturada
3. **Serviço água em superfície** = água superficial
4. **Serviço água filtrada** = zona não saturada.
5. **Zona saturada**= coluna de água na zona saturada. Essa é a quantidade verdadeira de água na zona de armazenamento.
6. **Zona não saturada**= altura da coluna de água na zona insaturada entre o limite da tabua de água saturada subterrânea e a superfície do sedimento. Essa é água real, se essa água é extraída fora do solo.

Fluxos:

1. **De zona saturada a superficial**= quando a capacidade de armazenamento total do solo é excedida, a água se incorpora a superfície inclusive antes de isto quando a elevação é superada pela cabeça de água uma parte de água saturada começa a aderisse ao armazenamento da superfície.
2. **De precipitação a água superficial**= as variáveis que afetam esse fluxo, são dois fluxos: o de precipitação à zona saturada e o de precipitação à zona não saturada. A entrada de água à zona superficial é a precipitação liquida menos a que entra à zona saturada e não saturada.
3. **De água superficial a zona saturada**= se não existia uma zona saturada anteriormente, mas agora tem uma, assume-se que apareceu como produto da transpiração e dos fluxos horizontais. Então toda a armazenagem de água na zona insaturada enche-se de água e a água saturada alcança de novo a superfície. Se existe água superficial suficiente, assume-se que os fluxos verticais de água superficial à água saturada são tão rápidos como os fluxos horizontais de água subterrânea + perdas pela transpiração.
4. **Evap. Água superficial**= água superficial evaporada unidades= m/dia nota: o que diz é: dessas duas expressões (evaporação e água superficial) tomar o valor mais baixo e considerá-lo como evaporação. A evaporação só considera os valores positivos (não existem valores negativos de água superficial). Essa evaporação se produz depois de dados os outros passos do balance hídrico. (isto pode-se observar se o modelo é ordenado em função da ordem de operações executadas no Stella.
5. **Fluxo superficial**= assume-se que toda a água disponível é removida da célula no sentido descendente, morro abaixo até a célula seguinte onde muda a altitude e a declividade pode ser constante. E o fluxo primário, fluxo superficial hortoniano (Ven te Chow et al, 1994). Conhece-se como a quantidade de água que despreza a intercepção da vegetação; e o fluxo laminar que transporta sedimentos superficiais quando o excesso de chuva (com precipitação constante é eliminado, é dizer aquela porção da chuva que o solo não pode absorver e que pelo efeito da declividade escoar e se acumula a jusante nos corpos de água superficiais. Unidades em m. Nota: o fluxo de escoamento sai a uma velocidade que esta dada em função da água em superfície e o valor de 1 que o converte-dor C a saída tem. O programa em cada iteração multiplica por dt. Ao dividir entre dt o produto das variáveis anteriores é multiplicado por 1 e não por dt. Se a saída não é dividida entre dt seria uma exponencial decrescente em função do valor de dt que se da ao modelo.
6. **De precipitação a zona saturada**= se se tem mais água para ser infiltrada que à capacidade da zona insaturada (if cond<0), elimina-se a zona insaturada devido a que sua capacidade de armazenamento é superada e a água vai diretamente à zona saturada aonde é armazenada. Nota: a equação diz : quando não existe infiltração regular, então o fluxo estaria dado pela diferença entre a capacidade de saturação e o fluxo de água que vai da superfície à zona saturada. Em qualquer outro caso não existe entrada por essa entrada
7. **Intercambio não saturada a saturada**= o primeiro termo (1) descreve a condição quando toda a capacidade não saturada disponível deve ser tomada pela infiltração e conseqüentemente o

armazenamento inteiro de insat deve ser eliminado e movimentado pelo tanque. O segundo termo (2) é a água agregada à sat de armazenamento de insat quando se levanta o nível de água. O terceiro (3) é o fluxo de percolação, varia não só com a mudança do nível de água, se não que também com a umidade do solo no armazenamento da insat. Formula: $m/d + m/d = m/d$ nota: entende-se assim que se não existe infiltração regular (o que passaria porque não ficam espaços vazios então tem que começar a drenar a zona não saturada passando a água à zona saturada. A 2da forma de passar é quando se dá a infiltração regular (ou seja que ainda se tem espaço disponível para a entrada de água).

8. **Intercambio saturada a não saturada**= a corrente contrária (de retorno da zona saturada) de água saturada ao armazenamento de insat quando se satura a zona de armazenamento
9. **Transpiração zona saturada**= a perda de água pela transpiração da zona saturada ocorre exponencialmente mais devagar conforme a zona não saturada diminui por debaixo da profundidade das raízes (pelo tanto reduzindo rapidamente a drenagem da sucção da matriz radicular (raiz)).
10. **Fluxo saída de saturada a célula seguinte**= movimento horizontal de água na zona saturada. Assume-se que a água saturada tende à condição inicial.
11. **De zona saturada a recarga**= movimento de água ao aquífero profundo
12. **De precipitação a zona não saturada**= se a infiltração regular é maior que zero então tomar os valores de infiltração. No caso contrário não entra água por esse fluxo à zona insaturada.
13. **Evapotranspiração zona não saturada**= a perda de água pela transpiração se divide entre a zona saturada e não saturada, a perda da área saturada pode ocorrer incluso quando as raízes não alcançam de forma absoluta a tabua de água pela ação capilar.

Variáveis auxiliares:

1. **Água disponível raízes**= disponibilidade de água para o sistema de raízes da planta. Se a profundidade da raiz > profundidade da zona insaturada, o valor de retorno é 1,0 (sem dimensões). Se a zona insaturada está debaixo da profundidade da zona da raiz o valor retornado é a proporção da umidade. Uma proporção exponencial de diminuição da saturação. Assim a água pode estar completamente disponível ainda que a insaturada tenha água disponível de 85%. Isso é devido à adição de água pela ação capilar da saturada. Se não a disponibilidade de água é definida pela proporção da umidade, o ponto de murchamento (assumido para ser 0,1 da capacidade de campo) e a capacidade de seca (assumida para ser 0,6 da capacidade de campo) (pag. 4.46 em Shuttleworth).
2. **Altura vegetação**= inserir dados de altura da vegetação em m.
3. **Ampl**= $1.16666667 \cdot \pi / 180$
4. **Ampl dia**= comprimento do dia em horas.
5. **Armazenagem**= armazenagem de água, zona saturada.
6. **Capacidade zona não saturada**= é o espaço poroso que a umidade do solo pode ocupar por debaixo do nível do lençol freático. Pelo que é o armazenamento máximo possível de umidade na zona insaturada (insat) menos a umidade disponível dentro da mesma zona não saturada. Nota: o armazenamento máximo da umidade é de 100% a partir de ali a zona será considerada como saturada.
7. **Ch**= fórmula da evaporação: componente da umidade relativa do ar. A umidade relativa é de 60%, usada por Christiansen (1968).
8. **Chuva conv.**= fator de conversão de mm a m; mm dia^{-1} a $\text{m dia}^{-1} = 0.001$
9. **Condição zona não saturada em metros**= se a elevação é maior que o lençol freático.
10. **Condutividade horizontal**= é função do mapa de solo na espacialização.
11. **Condutividade vertical**= a condutividade vertical do solo saturado é dependente do tipo de solo. Isto pode ser diferente da condutividade horizontal do sedimento do aquífero. As unidades dos dados de m/d [nubsam] em base de dados são: areia=3 franco arenoso= 0,75 franco= 0,09 franco argiloso=0,025 argila= 0,0075 o modelo deve rodar-se com diferentes tipos de condutividade hidráulica, pois a porosidade varia pelo tipo de solo, textura e condutividade horizontal e vertical e seu grau de erodibilidade
12. **Ct**= fórmula da evaporação: componente da temperatura. A temperatura é relativa a 20 graus centígrados, usada por Christiansen (1968).
13. **Cw**= fórmula da evaporação: componente vento. Emprega-se a velocidade standard de 6.7 km/hr proposto por Christiansen 1968.

14. **C ajuste da evaporação zona não saturada**= esse valor decrementa o valor da evaporação do solo relativa à evaporação da água. Não é preciso modificar essa quantidade.
15. **C declividades**= as declividades são expressas em mapas na espacialização. 1= não existe declividade 9= área donde se dá a máxima declividade assume-se que a maior inclinação, menor, será a taxa de infiltração. A inclinação das ladeiras onde escoar a água excedente, é expressada em porcentagem de inclinação ou em graus de inclinação. Valores de entrada entre 0 e 90 graus.
16. **C evaporação**= constante de evaporação, valor= 0.000482 (Christiansen, 1968). Nota: podem ser usados os dados diretos de evaporação do local.
17. **C fluxo superficial**= constante de fluxo de saída de água da matriz do solo. Valor=1 porque sai toda a água que fica na água superficial.
18. **C horiz. Hc**= calibração
19. **C infiltração por habitat**= taxa de infiltração modificada por tipo de habitat. Nota: o valor de essa constante varia entre 0 e 1 (se não é significativo pode ser omitido).
20. **C interceptação dos galhos**= água interceptada pelos galhos.
21. **C interceptação do dossel**= água interceptada pelo dossel da vegetação. (podem aplicar-se diferentes valores de acordo ao tipo de vegetação).
22. **C interceptação horizontal**= água interceptada pela neblina.
23. **C latitude em graus**= inserir a latitude do local em graus.
24. **C saída de zona saturada**= constante de saída de água. Valor=0.1 nota: essa taxa tem valor de 0, com isso é possível quantificar a quantidade de água armazenada.
25. **C sup. Delta**= que tão baixa é a elevação mínima na célula com respeito a media da elevação.
26. **C taxa recarga aquíferos**= taxa de recarga do aquífero. Valor= 0.0001 nota: essa taxa tem valor de 0, com isso é possível quantificar a quantidade de água armazenada.
27. **C transpiração**= constante da transpiração é de 0.01 dimless. Valor= 0.5
28. **C zig**= zigzag da rede hidráulica. Entre maior seja a longitude real da rede em relação a uma reta dentro de uma célula maior quantidade de água infiltrará nela. Valor=25.
29. **D**= déficit do vapor de pressão /1000 para converter Pa em kPa. Equação = $es - Pa/1000$
30. **Datum nmm**= distância (+) entre o dado base e o nível meio do mar. O dado base está embaixo do nível meio do mar.
31. **Delta**= gradiente da pressão de saturação da água. Derivada de: $es \text{ kPa}/^{\circ}C^2$
32. **Delta zona não saturada**= mudanças na profundidade da água na zns. Delta>0 quando a tabua de água sobe; delta<0 quando a tabua de água diminui.
33. **Dia**= dia juliano 1 de 365.
34. **Dias com neblina**= 1 dia com neblina, 0 dia sem neblina. São os dias com neblina e os sem neblina durante os 365 do ano.
35. **Direta**= inserir dados diários de evaporação em mm.
36. **Das**= déficit de saturação do ambiente. Dimless.
37. **Elevação**= se existe superfície de sedimentos embaixo do nível médio do mar (nmm) então use os dados de batimetria (profundidade debaixo do nmm) para determinar a elevação de sedimentos sobre o nível do mar. Usar os dados da elevação da terra sobre o nmm (que indica a distância de nmm à superfície do solo). Mas a distância do dado ao nível do mar. Todos os valores são positivos (m).
38. **Elevação mmm**= elevação da terra em metros sobre o nível meio do mar (nmm).
39. **Elev min**= elevação mínima numa célula. Usada para calcular a profundidade possível dos barrancos, cânones, as depressões que tem correntes neles. Garante o intercambio apropriado entre a zona saturada e a água superficial na rede do fluxo superficial. Naquelas áreas donde a elevação é menor que $2^{\circ}C$ surf delta, a elevação mínima vem a ser perto à elevação e é igual à elevação de elevação =0
40. **Energia**= fluxo radioativo estimado líquido, baseado na radiação solar atmosférica superior.
41. **Es**= pressão de vapor saturado (kPa),
42. **Et pm**= equação de Penman-Montheith para o cálculo da evapotranspiração (ver Shuttleworth, 1993. Manual de hidrologia).
43. **Et thornthwaite**= inserir dados diários de evapotranspiração de acordo a Thornthwaite em mm/dia.

44. **Evaporação**= a *pan evaporation* da superfície (m/dia) é calculada de acordo ao modelo de Christiansen (Saxon e McGuinness, 1982) o modelo usa como variáveis independentes: temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade. Existem outros métodos que podem ser usados (ver Chow 1994, pag. 88-92). Nota: a explicação desta função esta mais desenvolvida em Fitz *et al* (1996).
45. **Evaporação zona não saturada**= quando o IAF é menor que 1, então existe uma fração dp solo sem cobertura pelo que a água poderia evaporar.
46. **fração transpiração na zona não saturada**= fraccao transpiracao que acontece na zona insaturada 0.1 assume ser o umbral da profundidade depois da qual a ação capilar pode ser ignorada. Uma vez alcançada à zona de < 0,1 uma quantidade crescente de água é sugada da zona saturada.
47. **Gamma**= constante psicotécnica. Unidades= kPa/°c
48. **Umidade**= inserir dados diários de umidade relativa do ar. Valores de 0 a 100 s/u
49. **Umidade relativa zona não saturada**= condição inicial da proporção relativa de umidade na zona não saturada. Valores entre 0 e 1 s/u.
50. **laf**= índice de área foliar. Inserir valores da área foliar s/u.
51. **Infiltração**= fluxo potencial de água de PP que passa à camada seguinte. Esta é uma funcao da declividade do solo e do tipo de habitat. Se expressa em $m\ d^{-1}$.
52. **Infiltração regular**= água condições para infiltração regular: >0 quando a infiltração se da segundo os parâmetros estabelecidos. =0 quando existe mais água que se infiltra que à capacidade de armazenagem disponível da insat. Se a 2da. Condição se cumpre, então a insat se satura e o excesso de água passa à AS. Nota: se o fluxo que vai da superfície à zona saturada é igual à capacidade de saturação não se tem infiltração regular (0) então a infiltração regular corresponde aos valores positivos da diferença entre à capacidade de saturação e a infiltração.
53. **Insat capilar**= uma pequena adição para explicar a possível sucção da água do armazenamento saturado pela força da capilaridade quando as raízes estão perto da profundidade não saturada.
54. **Insat exc h%**= influência da proporção da umidade na taxa de kf
55. **Insat hum frac**= proporção de água armazenada na zona insaturada é=0 quando o deposito de ZNS esta vácuo. Calculo da condutividade hidráulica como uma função do nível de saturação.
56. **Insat taxa perc**= taxa potencial de percolação da insat à saturada. A condutividade hidráulica (kf) da insat varia com a umidade do solo. O gráfico usa limites de percolação da água livre disponível por gravidade= (sobre capacidade de campo). Influência da proporção de umidade na taxa de condutividade hidráulica da zona saturada (ZS).
57. **Interceptação**= intercepção da chuva pela vegetação (m). Se não existe vegetação uma pequena proporção da precipitação pode ser interceptada pelos galhos, se não a quantidade interceptada é uma função da área foliar
58. **Lambda**= calor latente de vapor de água. Unidades= mj/kg
59. **Max água sat**= quantidade máxima de água que pode subir a superfície
60. **neblina**= neblina diaria (tenths) (Nikolov e Zeller). Nota: quando usada na equação os valores restritivos negativos= 0. Na equação a precipitação é a PP mensal total em mm.
61. **Umidade relativa zona não saturada**= proporção relativa da umidade na zona não saturada.
62. **P**= assume-se como constante devido a baixa sensibilidade do modelo a esse parâmetro. 1 atm.= 760 mm = 1.013×10^2 kPa valor= 101.3
63. **Pa**= pressão de vapor diaria.
64. **Penman montheith**= método para o calculo da evapotranspiração.
65. **Porosidade**= nota: propriedade intrínseca ao tipo de solo. Os solos assim como os sedimentos e a maioria das rochas apresentam diferentes números de poros, de diâmetros diversos. Essa característica depende explicitamente da textura do solo, sua densidade aparente, a estrutura e conteúdo de matéria orgânica. Essa é definida como os espaços vácuos o cheios (de água ou de ar) que se encontram nas partículas.
66. **Precipitação**= conversão da precipitação de $mm\ d^{-1}$ a $m\ d^{-1}$. (Eq= chuva conversor* precipitação).
67. **Precipitação em mm**= inserir os dados diários de chuva (mm) do local.
68. **Precipitação horizontal**= se assume que a precipitação horizontal é um 17% da precipitação vertical.

69. **Precipitação líquida**= é a quantidade de água que chega ao solo, derivada da precipitação total menos a interceptação. Equação= PP total – interceptação.
70. **Precipitação total**= é a quantidade de água que se deriva da precipitação em forma de chuva, neve, nevoa e por congelamento.
71. **Precipitação vertical ou PP**= precipitação como chuva em m/dia. A precipitação é considerada só se a temperatura do ar é maior a 0°C, caso contrário essa precipitação é incluída no processo de formação da neve.
72. **Profundidade nível meio mar em metros**= unidades m.
73. **Profundidade raízes em metros**= inserir os valores da profundidade das raízes em metros..
74. **Profundidade zona não saturada**= profundidade da camada não saturada. Nota: tomar o valor positivo da diferença entre a elevação e o nível Máximo de saturação.
75. **Profundidade zona não saturada num período anterior**= a profundidade da zona não saturada imediatamente antes de saturar-se. Define se a tabua de água esta subindo ou caindo. A equação diz: tomar o valor de "profundidade da zona não saturada" obtido na iteração anterior.
76. **Profundidade lençol freático em metros**= a altura (+) em metros da tabua saturada de água.
77. **rA= resistência aerodinâmica**= unidades = s/m (vento m/s= 3,6 km/hora). Assume-se que as medidas da velocidade do vento e umidade estão tomadas a 25 m de altura.
78. **Ro**= densidade do ar. Unidades= kg m³.
79. **Rs**= resistência superficial. A formula original é 200/IAF. No entanto neste caso *Et* não diminui no entanto *Ra* aumenta. Para que isso seja proporcional precisamos ter essa *Et* em função da *rA*. $Et \cdot \lambda = (p + q + rA) / (a + b/rA)$ esta diminuindo ($p = \Delta \cdot \text{energy}$, $b = \gamma \cdot rs$, $a = \Delta + \gamma$, $q = 1.013 \cdot ro \cdot d$). Isso é alcançado quando a derivada é negativa, que é: $\Delta \cdot \text{energy} / (\Delta + \gamma) < 1.013 \cdot ro \cdot d / \gamma / rs$.
80. **Sat escoamento**= a quantidade de água saturada relativa à elevação mínima excede a superfície e inicia o escoamento.
81. **sat niv max**= altura atual da tabua de água.
82. **Solradatm**= formula empírica que equipara os resultados de Nikolov and Zeller (1992), más são muito mais simples. Calcula a radiação solar atmosférica. Nota: essa radiação é confiável para latitudes entre 20 e 64 graus. Não sabemos ate onde é confiavel para outras latitudes.
83. **Solradgr**= correção para dias nublados. $Ecc = 0.55 \cdot \text{soldaratm} \cdot (1 - 0.05 \cdot \text{nubosidade})$.
84. **Tabua de água**= equação= 1c h tabla + datum nmm.
85. **Tam célula**= tamanho da unidade de área (superfície mínima de aplicação do modelo). Unidades= m²; valor= 40.000
86. **Taxas infiltração no solo**= a taxa de infiltração original é um produto.
87. **Temp ar c**= inserir os valores diários de temperatura em °C.
88. **Temp max ar**= temperatura maxima do ar em °C.
89. **Textura**= textura do solo.
90. **Thornthwaite**= método para estimar a evapotranspiração.
91. **Tipo de habitat**= numero de habitat: 3=culturas 2=florestas ou matas (com arvores) 1=corpos de água outro não definido. O modelo só distingue entre 1 e qualquer outra possibilidade e para o projeto de serviços ecossistêmicos hídricos só o tipo 2 será de interesse.
92. **Tipo solo**= o tipo de solo é descrito como uma variável de rango e vai entre 1 (estável) e 10 (instável). Solo estável=1 geralmente são solos de climas úmidos com humus abundante e boa capacidade de filtração e percolação. Solo instável=10 geralmente são solos de climas secos com pouco humus e baixa capacidade de drenagem.
93. **Transpiração**= transpiração potencial por macrofitas incluindo o efeito de tensão da água. Unidades = $m/d \cdot m/d \cdot \text{dimless} \cdot \text{dimless} \cdot \text{dimless} \cdot \text{dimless} \cdot (m^2/m^2) = m/d$. Índice maximo de transpiração da água da planta pelos estomas. Se a água não estivesse limitando ou estressando às plantas a qualquer grau. Unidades= hr/dia* (mol de m⁻² sec⁻¹ * sec/hr * kg/mol*m³/kg)* dimless= m água/dia
94. **T rad**= conversão de dias a radianes: dias a graus 360/365 graus a radianes= $\pi/180$ jul/dia=2/365* π *jul/dia o dia mais longo é o 173 que corresponde ao 22 de junho. Nota: só é uma conversão
95. **Velocidade vento**= ingressar os dados da velocidade diária do vento expressada em km/hr. O modelo de Christiansen para calcular a evaporação potencial e o de Penman-Monteith indicam que à altura a qual deverão ser tomados esses dados é de 2 metros acima do solo.

96. **Zona superficial em metros**= condição inicial da altura da água superficial sobre a superfície:sedimentos/solo.

Anexo B – Diagramas de estoque e fluxo dos processos ecossistêmicos que compreende o MOVA

i) Setor precipitação e interceptação

ii) Setor evaporação

iii) Setor infiltração

iv) Setor evapotranspiração

v) Setor Percolação

vi) Setor armazenagem de água

Anexo C – Código do modelo

```

    AGUA_SUPER_FICIAL(t) = AGUA_SUPER_FICIAL(t - dt) +
(DE_ZONA_SATURADA_A_SUPERFICIAL + DE_PRECIPITACAO__A_AGUA_SUPERFICIAL -
DE_AGUA_SUPERFICIAL_A_ZONA_SATURADA - EVAP_AGUA__SUPERFICIAL -
FLUXO_SUPERFICIAL) * dt
    INIT AGUA_SUPER_FICIAL = ZONA_SUPERFICIAL_EM_METROS
    INFLOWS:
    DE_ZONA_SATURADA_A_SUPERFICIAL =
IF(ZONA__SATURADA>MAX_AGUA_SAT)THEN(ZONA__SATURADA-MAX_AGUA_SAT)ELSE
IF(ZONA__SATURADA>SAT_ESCOAMENTO)THEN(C_ZIG)*(ZONA__SATURADA-
SAT_ESCOAMENTO)*CONDUCTIVIDADE_HORIZONTAL ELSE(0)
    DE_PRECIPITACAO__A_AGUA_SUPERFICIAL = PRECIPITACAO_LIQUIDA-
DE_PRECIPITACAO_A_ZONA_NAO_SATURADA-DE_PRECIPITACAO__A_ZONA_SATURADA
    OUTFLOWS:
    DE_AGUA_SUPERFICIAL_A_ZONA_SATURADA = IF(TIPO_DE_HABITAT= 1
OR(PROFUNDIDADE__ZONA_NAO_SATURADA_NUM_PERIODO_ANTERIOR= 0
AND(CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA>0)))THEN(MIN(CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA
, AGUA_SUPER_FICIAL/DT))ELSE(0)
    EVAP_AGUA__SUPERFICIAL = MIN(MAX(EVAPORACAO, 0), AGUA_SUPER_FICIAL/DT)
    FLUXO_SUPERFICIAL = C_FLUXO_SUPERFICIAL*AGUA_SUPER_FICIAL/DT
    SERVICIO_AGUA_ARMAZENADA(t) = SERVICIO_AGUA_ARMAZENADA(t - dt) + (Noname_2) * dt
    INIT SERVICIO_AGUA_ARMAZENADA = 0
    INFLOWS:
    Noname_2 = ZONA__SATURADA
    SERVICIO_AGUA_EM_SUPERFICIE(t) = SERVICIO_AGUA_EM_SUPERFICIE(t - dt) +
(Noname_3) * dt
    INIT SERVICIO_AGUA_EM_SUPERFICIE = 0
    INFLOWS:
    Noname_3 = AGUA_SUPER_FICIAL
    SERVICIO_AGUA_FILTRADA(t) = SERVICIO_AGUA_FILTRADA(t - dt) + (Noname_1) * dt
    INIT SERVICIO_AGUA_FILTRADA = 0
    INFLOWS:
    Noname_1 = ZONA_NAO_SATURADA
    ZONA__SATURADA(t) = ZONA__SATURADA(t - dt) +
(DE_PRECIPITACAO__A_ZONA_SATURADA + INTERCAMBIO__NAO_SATURADA_A_SATURADA +
DE_AGUA_SUPERFICIAL_A_ZONA_SATURADA - INTERCAMBIO_SATURADA_A_NAO_SATURADA -
TRANSPIRACAO__ZONA_SATURADA - FLUXO_SAIDA_DE_SATURADA_A_CELULA_SEGUINTE -
DE_ZONA_SATURADA_A_RECARGA - DE_ZONA_SATURADA_A_SUPERFICIAL) * dt
    INIT ZONA__SATURADA = CONDICAO_INICIAL_ZONA_SATURADA
    INFLOWS:
    DE_PRECIPITACAO__A_ZONA_SATURADA =
IF(INFILTRACAO_REGULAR=0)THEN(CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA-
DE_AGUA_SUPERFICIAL_A_ZONA_SATURADA)ELSE(0)
    INTERCAMBIO__NAO_SATURADA_A_SATURADA =
IF(INFILTRACAO_REGULAR=0)THEN(ZONA_NAO_SATURADA/DT)ELSE(MAX(0,
DELTA_ZONA_NAO_SATURADA)*INSAT_HUM_FRAC)+INSAT_TAXA_PERC
    DE_AGUA_SUPERFICIAL_A_ZONA_SATURADA = IF(TIPO_DE_HABITAT= 1
OR(PROFUNDIDADE__ZONA_NAO_SATURADA_NUM_PERIODO_ANTERIOR= 0
AND(CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA>0)))THEN(MIN(CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA
, AGUA_SUPER_FICIAL/DT))ELSE(0)
    OUTFLOWS:
    INTERCAMBIO_SATURADA_A_NAO_SATURADA = MAX(0, MIN(-
DELTA_ZONA_NAO_SATURADA*CAPACIDADE_DE_CAMPO, ZONA__SATURADA/DT))

```

```

    TRANSPIRACAO_ZONA_SATURADA = TRANSPIRACAO*(1-
FRACAO_TRANSPIRACAO_NA_ZONA_NAO_SATURADA)
    FLUXO_SAIDA_DE_SATURADA_A_CELULA_SEGUINTE =
C_SAIDA_DE_ZONA_SATURADA*(ZONA_SATURADA-CONDICAO_INICIAL_ZONA_SATURADA)
    DE_ZONA_SATURADA_A_RECARGA = C_TAXA_RECARGA_AQUIFEROS
    DE_ZONA_SATURADA_A_SUPERFICIAL =
IF(ZONA_SATURADA>MAX_AGUA_SAT)THEN(ZONA_SATURADA-MAX_AGUA_SAT)ELSE
IF(ZONA_SATURADA>SAT_ESCOAMENTO)THEN(C_ZIG)*(ZONA_SATURADA-
SAT_ESCOAMENTO)*CONDUCTIVIDADE_HORIZONTAL ELSE(0)
    ZONA_NAO_SATURADA(t) = ZONA_NAO_SATURADA(t - dt) +
(INTERCAMBIO_SATURADA_A_NAO_SATURADA +
DE_PRECIPITACAO_A_ZONA_NAO_SATURADA - INTERCAMBIO_NAO_SATURADA_A_SATURADA
- EVAPOTRANPIRACAO_ZONA_NAO_SATURADA) * dt
    INIT ZONA_NAO_SATURADA = CONDICAO_ZONA_NAO_SATURADA_EM_METROS
    INFLOWS:
    INTERCAMBIO_SATURADA_A_NAO_SATURADA = MAX(0, MIN(-
DELTA_ZONA_NAO_SATURADA*CAPACIDADE_DE_CAMPO, ZONA_SATURADA/DT))
    DE_PRECIPITACAO_A_ZONA_NAO_SATURADA =
IF(INFILTRACAO_REGULAR>0)THEN(INFILTRACAO)ELSE(0)
    OUTFLOWS:
    INTERCAMBIO_NAO_SATURADA_A_SATURADA =
IF(INFILTRACAO_REGULAR=0)THEN(ZONA_NAO_SATURADA/DT)ELSE(MAX(0,
DELTA_ZONA_NAO_SATURADA)*INSAT_HUM_FRAC)+INSAT_TAXA_PERC
    EVAPOTRANPIRACAO_ZONA_NAO_SATURADA =
TRANSPIRACAO*FRACAO_TRANSPIRACAO_NA_ZONA_NAO_SATURADA+EVAPORACAO_ZONA_
NAO_SATURADA
    AGARMmcubha = (SERVICO_AGUA_ARMAZENADA/4*0.01)/0.001
    AGFILmcubha = (SERVICO_AGUA_FILTRADA/4)*(0.01/0.001)
    AGSUPmcubha = (SERVICO_AGUA_EM_SUPERFICIE/4*0.01)/0.001
    AGUA_DISPONIVEL_RAIZES = MIN(1, 0,
INSAT_CAPILAR)+(IF(INSAT_HUM_FRAC<0.1*CAPACIDADE_DE_CAMPO)THEN(0)ELSE(IF(INSAT_H
UM_FRAC>0.6*CAPACIDADE_DE_CAMPO)THEN(1)ELSE(INSAT_HUM_FRAC-
0.1*CAPACIDADE_DE_CAMPO)/0.5/CAPACIDADE_DE_CAMPO))
    ALTURA_VEGETACAO = GRAPH(DIA)
    (1.00, 10.0), (2.00, 10.0), (3.00, 10.0), (4.00, 10.0), (5.00, 10.0), (6.00, 10.0), (7.00, 10.0), (8.00,
10.0), (9.00, 10.0), (10.0, 10.0), (11.0, 10.0), (12.0, 10.0), (13.0, 10.0), (14.0, 10.0), (15.0, 10.0), (16.0,
10.0), (17.0, 10.0), (18.0, 10.0), (19.0, 10.0), (20.0, 10.0), (21.0, 10.0), (22.0, 10.0), (23.0, 10.0), (24.0,
10.0), (25.0, 10.0), (26.0, 10.0), (27.0, 10.0), (28.0, 10.0), (29.0, 10.0), (30.0, 10.0), (31.0, 10.0), (32.0,
10.0), (33.0, 10.0), (34.0, 10.0), (35.0, 10.0), (36.0, 10.0), (37.0, 10.0), (38.0, 10.0), (39.0, 10.0), (40.0,
10.0), (41.0, 10.0), (42.0, 10.0), (43.0, 10.0), (44.0, 10.0), (45.0, 10.0), (46.0, 10.0), (47.0, 10.0), (48.0,
10.0), (49.0, 10.0), (50.0, 10.0), (51.0, 10.0), (52.0, 10.0), (53.0, 10.0), (54.0, 10.0), (55.0, 10.0), (56.0,
10.0), (57.0, 10.0), (58.0, 10.0), (59.0, 10.0), (60.0, 10.0), (61.0, 10.0), (62.0, 10.0), (63.0, 10.0), (64.0,
10.0), (65.0, 10.0), (66.0, 10.0), (67.0, 10.0), (68.0, 10.0), (69.0, 10.0), (70.0, 10.0), (71.0, 10.0), (72.0,
10.0), (73.0, 10.0), (74.0, 10.0), (75.0, 10.0), (76.0, 10.0), (77.0, 10.0), (78.0, 10.0), (79.0, 10.0), (80.0,
10.0), (81.0, 10.0), (82.0, 10.0), (83.0, 10.0), (84.0, 10.0), (85.0, 10.0), (86.0, 10.0), (87.0, 10.0), (88.0,
10.0), (89.0, 10.0), (90.0, 10.0), (91.0, 10.0), (92.0, 10.0), (93.0, 10.0), (94.0, 10.0), (95.0, 10.0), (96.0,
10.0), (97.0, 10.0), (98.0, 10.0), (99.0, 10.0), (100, 10.0), (101, 10.0), (102, 10.0), (103, 10.0), (104, 10.0),
(105, 10.0), (106, 10.0), (107, 10.0), (108, 10.0), (109, 10.0), (110, 10.0), (111, 10.0), (112, 10.0), (113,
10.0), (114, 10.0), (115, 10.0), (116, 10.0), (117, 10.0), (118, 10.0), (119, 10.0), (120, 10.0), (121, 10.0),
(122, 10.0), (123, 10.0), (124, 10.0), (125, 10.0), (126, 10.0), (127, 10.0), (128, 10.0), (129, 10.0), (130,
10.0), (131, 10.0), (132, 10.0), (133, 10.0), (134, 10.0), (135, 10.0), (136, 10.0), (137, 10.0), (138, 10.0),
(139, 10.0), (140, 10.0), (141, 10.0), (142, 10.0), (143, 10.0), (144, 10.0), (145, 10.0), (146, 10.0), (147,
10.0), (148, 10.0), (149, 10.0), (150, 10.0), (151, 10.0), (152, 10.0), (153, 10.0), (154, 10.0), (155, 10.0),
(156, 10.0), (157, 10.0), (158, 10.0), (159, 10.0), (160, 10.0), (161, 10.0), (162, 10.0), (163, 10.0), (164,
10.0), (165, 10.0), (166, 10.0), (167, 10.0), (168, 10.0), (169, 10.0), (170, 10.0), (171, 10.0), (172, 10.0),
(173, 10.0), (174, 10.0), (175, 10.0), (176, 10.0), (177, 10.0), (178, 10.0), (179, 10.0), (180, 10.0), (181,

```

10.0), (182, 10.0), (183, 10.0), (184, 10.0), (185, 10.0), (186, 10.0), (187, 10.0), (188, 10.0), (189, 10.0), (190, 10.0), (191, 10.0), (192, 10.0), (193, 10.0), (194, 10.0), (195, 10.0), (196, 10.0), (197, 10.0), (198, 10.0), (199, 10.0), (200, 10.0), (201, 10.0), (202, 10.0), (203, 10.0), (204, 10.0), (205, 10.0), (206, 10.0), (207, 10.0), (208, 10.0), (209, 10.0), (210, 10.0), (211, 10.0), (212, 10.0), (213, 10.0), (214, 10.0), (215, 10.0), (216, 10.0), (217, 10.0), (218, 10.0), (219, 10.0), (220, 10.0), (221, 10.0), (222, 10.0), (223, 10.0), (224, 10.0), (225, 10.0), (226, 10.0), (227, 10.0), (228, 10.0), (229, 10.0), (230, 10.0), (231, 10.0), (232, 10.0), (233, 10.0), (234, 10.0), (235, 10.0), (236, 10.0), (237, 10.0), (238, 10.0), (239, 10.0), (240, 10.0), (241, 10.0), (242, 10.0), (243, 10.0), (244, 10.0), (245, 10.0), (246, 10.0), (247, 10.0), (248, 10.0), (249, 10.0), (250, 10.0), (251, 10.0), (252, 10.0), (253, 10.0), (254, 10.0), (255, 10.0), (256, 10.0), (257, 10.0), (258, 10.0), (259, 10.0), (260, 10.0), (261, 10.0), (262, 10.0), (263, 10.0), (264, 10.0), (265, 10.0), (266, 10.0), (267, 10.0), (268, 10.0), (269, 10.0), (270, 10.0), (271, 10.0), (272, 10.0), (273, 10.0), (274, 10.0), (275, 10.0), (276, 10.0), (277, 10.0), (278, 10.0), (279, 10.0), (280, 10.0), (281, 10.0), (282, 10.0), (283, 10.0), (284, 10.0), (285, 10.0), (286, 10.0), (287, 10.0), (288, 10.0), (289, 10.0), (290, 10.0), (291, 10.0), (292, 10.0), (293, 10.0), (294, 10.0), (295, 10.0), (296, 10.0), (297, 10.0), (298, 10.0), (299, 10.0), (300, 10.0), (301, 10.0), (302, 10.0), (303, 10.0), (304, 10.0), (305, 10.0), (306, 10.0), (307, 10.0), (308, 10.0), (309, 10.0), (310, 10.0), (311, 10.0), (312, 10.0), (313, 10.0), (314, 10.0), (315, 10.0), (316, 10.0), (317, 10.0), (318, 10.0), (319, 10.0), (320, 10.0), (321, 10.0), (322, 10.0), (323, 10.0), (324, 10.0), (325, 10.0), (326, 10.0), (327, 10.0), (328, 10.0), (329, 10.0), (330, 10.0), (331, 10.0), (332, 10.0), (333, 10.0), (334, 10.0), (335, 10.0), (336, 10.0), (337, 10.0), (338, 10.0), (339, 10.0), (340, 10.0), (341, 10.0), (342, 10.0), (343, 10.0), (344, 10.0), (345, 10.0), (346, 10.0), (347, 10.0), (348, 10.0), (349, 10.0), (350, 10.0), (351, 10.0), (352, 10.0), (353, 10.0), (354, 10.0), (355, 10.0), (356, 10.0), (357, 10.0), (358, 10.0), (359, 10.0), (360, 10.0), (361, 10.0), (362, 10.0), (363, 10.0), (364, 10.0), (365, 10.0)

AMPL = EXP(7.42+0.045*LatGrausDec)/3600

AMPL_DIA = AMPL*SIN((DIA-79)*0.01721)+12

AngRadSol = IF(X<=0)THEN(0.00001)ELSE((PI/2)-ARCTAN(-1*TAN(LatRadian)*TAN(DeclinSolar)/SQRT(X)))

ARMAZENAGEM = ZONA__SATURADA*TAM_CELULA

CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA =

MAX(PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA*(POROSIDADE_D-INSAT_HUM_FRAC),0)

CAPACIDADE_DE_CAMPO = IF TEXTURA[AREIA]=1 THEN 0.1733 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_ARENOSO]=1 THEN 0.1789 ELSE

IF TEXTURA[ARENOSO_FRANCO]=1 THEN 0.2483 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_LIMOSO]=1 THEN 0.3679 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO]=1 THEN 0.3134 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_ARENO_ARGILOSO]=1 THEN 0.2985 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_LIMO_ARGILOSO]=1 THEN 0.3565 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_ARGILOSO]=1 THEN 0.3905 ELSE

IF TEXTURA[ARGILO_ARENOSO]=1 THEN 0.3162 ELSE

IF TEXTURA[ARGILO_LIMOSO]=1 THEN 0.4084 ELSE

IF TEXTURA[ARGILA]=1 THEN 0.3999 ELSE

IF TEXTURA[ORIGINAL]=1 THEN 0.25 ELSE 0

CH = 1.035+0.240*(UMIDADE/60)^2-0.275*(UMIDADE/60)^3

CHUVA_CONV = 0.001

CONDICAO_INICIAL_ZONA_SATURADA = TABLA_DE_AGUA*POROSIDADE_D

CONDICAO_ZONA_NAO_SATURADA_EM_METROS =

IF(ELEVACAO>TABLA_DE_AGUA)THEN(ELEVACAO-

TABLA_DE_AGUA)*(C_UMIDADE_RELATIVA__ZONA_NAO_SATURADA)ELSE(0)

CONDUCTIVIDADE_HORIZONTAL =

C_HORIZ_HC*CONDUCTIVIDADE__HIDRAULICA/SQRT(TAM_CELULA)+TIPO_SOLO*0.0

CONDUCTIVIDADE__HIDRAULICA = IF TEXTURA[AREIA]=1 THEN 15.21 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_ARENOSO]=1 THEN 13.48 ELSE

IF TEXTURA[ARENOSO_FRANCO]=1 THEN 3 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_LIMOSO]=1 THEN 0.62 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO]=1 THEN 0.60 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_ARENO_ARGILOSO]=1 THEN 0.54 ELSE

IF TEXTURA[FRANCO_LIMO_ARGILOSO]=1 THEN 0.15 ELSE

```

IF TEXTURA[FRANCO_ARGILOSO]=1 THEN 0.21 ELSE
IF TEXTURA[ARGILO_ARENOSO]=1 THEN 0.19 ELSE
IF TEXTURA[ARGILO_LIMOSO]=1 THEN 0.09 ELSE
IF TEXTURA[ARGILA]=1 THEN 0.11 ELSE 0
CONDUTIVIDADE_VERTICAL = IF TEXTURA[AREIA]=1 THEN 3 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARENOSO]=1 THEN 0.75 ELSE
IF TEXTURA[ARENOSO_FRANCO]=1 THEN 0.75 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_LIMOSO]=1 THEN 0.09 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO]=1 THEN 0.09 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARENO_ARGILOSO]=1 THEN 0.09 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_LIMO_ARGILOSO]=1 THEN 0.025 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARGILOSO]=1 THEN 0.025 ELSE
IF TEXTURA[ARGILO_ARENOSO]=1 THEN 0.025 ELSE
IF TEXTURA[ARGILO_LIMOSO]=1 THEN 0.0075 ELSE
IF TEXTURA[ARGILA]=1 THEN 0.0075 ELSE
IF TEXTURA[ORIGINAL]=1 THEN 0.007 ELSE 0
CONVERSAO_EVAPORACAO = DIRECTA*0.001
CONVERSAO_EVAPOTRANSPIRACAO = ET_THORNTNTHWAITE*0.001
CT = 0.463+0.425*(TEMP_AR_C/20)+0.112*(TEMP_AR_C/20)^2
CW = 0.672+0.406*(VELOCIDADE_VENTO/6.7)+0.078*(VELOCIDADE_VENTO/6.7)^2
C_AJUSTE_DA_EVAPORACAO_ZONA_NAO_SATURADA = 0.5
C_DECLIVIDADES = 3
C_EVAPORACAO = 0.000482
C_FLUXO_SUPERFICIAL = 1
C_HORIZ_HC = 1
C_INFILTRACAO = 0.017
C_INFILTRACAO_POR_HABITAT = 1
C_INTERCEPCAO_DOS_GALHOS = 0.002
C_INTERCEPCAO_DO_DOSSEL = 0.001
C_SAIDA_DE_ZONA_SATURADA = 0.1
C_SUP_DELTA = 3.0
C_TAXA_RECARGA_AQUIFEROS = 0.0001
C_TRANSPIRACAO = 0.5
C_UMIDADE_RELATIVA_ZONA_NAO_SATURADA = 0.26
C_ZIG = 25
D = Es-Pa/1000
DATUM_NMM = 10
DeclinSolar = 0.409*SIN((2*PI/365)*DIA-1.39)
DELTA = 4098*Es/(237.3+TEMP_AR_C)/(237.3+TEMP_AR_C)
DELTA_ZONA_NAO_SATURADA =
PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA_NUM_PERIODO_ANTERIOR-
PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA
DIA = MOD(TIME-DT,365)+1
DIAS_COM_NEBLINA = GRAPH(DIA)
(1.00, 0.00), (2.00, 0.00), (3.00, 0.00), (4.00, 0.00), (5.00, 0.00), (6.00, 0.00), (7.00, 0.00), (8.00,
0.00), (9.00, 0.00), (10.0, 0.00), (11.0, 0.00), (12.0, 0.00), (13.0, 0.00), (14.0, 0.00), (15.0, 0.00), (16.0,
0.00), (17.0, 0.00), (18.0, 0.00), (19.0, 0.00), (20.0, 0.00), (21.0, 0.00), (22.0, 0.00), (23.0, 0.00), (24.0,
0.00), (25.0, 0.00), (26.0, 0.00), (27.0, 0.00), (28.0, 0.00), (29.0, 0.00), (30.0, 0.00), (31.0, 0.00), (32.0,
0.00), (33.0, 0.00), (34.0, 0.00), (35.0, 0.00), (36.0, 0.00), (37.0, 0.00), (38.0, 0.00), (39.0, 0.00), (40.0,
0.00), (41.0, 0.00), (42.0, 0.00), (43.0, 0.00), (44.0, 0.00), (45.0, 0.00), (46.0, 0.00), (47.0, 0.00), (48.0,
0.00), (49.0, 0.00), (50.0, 0.00), (51.0, 0.00), (52.0, 0.00), (53.0, 0.00), (54.0, 0.00), (55.0, 0.00), (56.0,
0.00), (57.0, 0.00), (58.0, 0.00), (59.0, 0.00), (60.0, 0.00), (61.0, 0.00), (62.0, 0.00), (63.0, 0.00), (64.0,
0.00), (65.0, 0.00), (66.0, 0.00), (67.0, 0.00), (68.0, 0.00), (69.0, 0.00), (70.0, 0.00), (71.0, 0.00), (72.0,
0.00), (73.0, 0.00), (74.0, 0.00), (75.0, 0.00), (76.0, 0.00), (77.0, 0.00), (78.0, 0.00), (79.0, 0.00), (80.0,
0.00), (81.0, 0.00), (82.0, 0.00), (83.0, 0.00), (84.0, 0.00), (85.0, 0.00), (86.0, 0.00), (87.0, 0.00), (88.0,
0.00), (89.0, 0.00), (90.0, 0.00), (91.0, 0.00), (92.0, 0.00), (93.0, 0.00), (94.0, 0.00), (95.0, 0.00), (96.0,

```

[illegible]

DIRETA = GRAPH(IF(DIRETA)THEN(TIME)ELSE(0))

(1.00, 2.50), (2.00, 2.50), (3.00, 2.50), (4.00, 2.50), (5.00, 2.50), (6.00, 2.50), (7.00, 2.50), (8.00, 2.50), (9.00, 2.50), (10.0, 2.50), (11.0, 2.50), (12.0, 2.50), (13.0, 2.50), (14.0, 2.50), (15.0, 2.50), (16.0, 2.50), (17.0, 2.50), (18.0, 2.50), (19.0, 2.50), (20.0, 2.50), (21.0, 2.50), (22.0, 2.50), (23.0, 2.50), (24.0, 2.50), (25.0, 2.50), (26.0, 2.50), (27.0, 2.50), (28.0, 2.50), (29.0, 2.50), (30.0, 2.50), (31.0, 2.50), (32.0, 2.50), (33.0, 2.50), (34.0, 2.50), (35.0, 2.50), (36.0, 2.50), (37.0, 2.50), (38.0, 2.50), (39.0, 2.50), (40.0, 2.50), (41.0, 2.50), (42.0, 2.50), (43.0, 2.50), (44.0, 2.50), (45.0, 2.50), (46.0, 2.50), (47.0, 2.50), (48.0, 2.50), (49.0, 2.50), (50.0, 2.50), (51.0, 2.50), (52.0, 2.50), (53.0, 2.50), (54.0, 2.50), (55.0, 2.50), (56.0, 2.50), (57.0, 2.50), (58.0, 2.50), (59.0, 2.50), (60.0, 2.50), (61.0, 2.50), (62.0, 2.50), (63.0, 2.50), (64.0, 2.50), (65.0, 2.50), (66.0, 2.50), (67.0, 2.50), (68.0, 2.50), (69.0, 2.50), (70.0, 2.50), (71.0, 2.50), (72.0, 2.50), (73.0, 2.50), (74.0, 2.50), (75.0, 2.50), (76.0, 2.50), (77.0, 2.50), (78.0, 2.50), (79.0, 2.50), (80.0, 2.50), (81.0, 2.50), (82.0, 2.50), (83.0, 2.50), (84.0, 2.50), (85.0, 2.50), (86.0, 2.50), (87.0, 2.50), (88.0, 2.50), (89.0, 2.50), (90.0, 2.50), (91.0, 2.50), (92.0, 2.50), (93.0, 2.50), (94.0, 2.50), (95.0, 2.50), (96.0, 2.50), (97.0, 2.50), (98.0, 2.50), (99.0, 2.50), (100, 2.50), (101, 2.50), (102, 2.50), (103, 2.50), (104, 2.50), (105, 2.50), (106, 2.50), (107, 2.50), (108, 2.50), (109, 2.50), (110, 2.50), (111, 2.50), (112, 2.50), (113, 2.50), (114, 2.50), (115, 2.50), (116, 2.50), (117, 2.50), (118, 2.50), (119, 2.50), (120, 2.50), (121, 2.50), (122, 2.50), (123, 2.50), (124, 2.50), (125, 2.50), (126, 2.50), (127, 2.50), (128, 2.50), (129, 2.50), (130, 2.50), (131, 2.50), (132, 2.50), (133, 2.50), (134, 2.50), (135, 2.50), (136, 2.50), (137, 2.50), (138, 2.50), (139, 2.50), (140, 2.50), (141, 2.50), (142, 2.50), (143, 2.50), (144, 2.50), (145, 2.50), (146, 2.50), (147, 2.50), (148, 2.50), (149, 2.50), (150, 2.50), (151, 2.50), (152, 2.50), (153, 2.50), (154, 2.50), (155, 2.50), (156, 2.50), (157, 2.50), (158, 2.50), (159, 2.50), (160, 2.50), (161, 2.50), (162, 2.50), (163, 2.50), (164, 2.50), (165, 2.50), (166, 2.50), (167, 2.50), (168, 2.50), (169, 2.50), (170, 2.50), (171, 2.50), (172, 2.50), (173, 2.50), (174, 2.50), (175, 2.50), (176, 2.50), (177, 2.50), (178, 2.50), (179, 2.50), (180, 2.50), (181, 2.50), (182, 2.50), (183, 2.50), (184, 2.50), (185, 2.50), (186, 2.50), (187, 2.50), (188, 2.50), (189, 2.50),

(190, 2.50), (191, 2.50), (192, 2.50), (193, 2.50), (194, 2.50), (195, 2.50), (196, 2.50), (197, 2.50), (198, 2.50), (199, 2.50), (200, 2.50), (201, 2.50), (202, 2.50), (203, 2.50), (204, 2.50), (205, 2.50), (206, 2.50), (207, 2.50), (208, 2.50), (209, 2.50), (210, 2.50), (211, 2.50), (212, 2.50), (213, 2.50), (214, 2.50), (215, 2.50), (216, 2.50), (217, 2.50), (218, 2.50), (219, 2.50), (220, 2.50), (221, 2.50), (222, 2.50), (223, 2.50), (224, 2.50), (225, 2.50), (226, 2.50), (227, 2.50), (228, 2.50), (229, 2.50), (230, 2.50), (231, 2.50), (232, 2.50), (233, 2.50), (234, 2.50), (235, 2.50), (236, 2.50), (237, 2.50), (238, 2.50), (239, 2.50), (240, 2.50), (241, 2.50), (242, 2.50), (243, 2.50), (244, 2.50), (245, 2.50), (246, 2.50), (247, 2.50), (248, 2.50), (249, 2.50), (250, 2.50), (251, 2.50), (252, 2.50), (253, 2.50), (254, 2.50), (255, 2.50), (256, 2.50), (257, 2.50), (258, 2.50), (259, 2.50), (260, 2.50), (261, 2.50), (262, 2.50), (263, 2.50), (264, 2.50), (265, 2.50), (266, 2.50), (267, 2.50), (268, 2.50), (269, 2.50), (270, 2.50), (271, 2.50), (272, 2.50), (273, 2.50), (274, 2.50), (275, 2.50), (276, 2.50), (277, 2.50), (278, 2.50), (279, 2.50), (280, 2.50), (281, 2.50), (282, 2.50), (283, 2.50), (284, 2.50), (285, 2.50), (286, 2.50), (287, 2.50), (288, 2.50), (289, 2.50), (290, 2.50), (291, 2.50), (292, 2.50), (293, 2.50), (294, 2.50), (295, 2.50), (296, 2.50), (297, 2.50), (298, 2.50), (299, 2.50), (300, 2.50), (301, 2.50), (302, 2.50), (303, 2.50), (304, 2.50), (305, 2.50), (306, 2.50), (307, 2.50), (308, 2.50), (309, 2.50), (310, 2.50), (311, 2.50), (312, 2.50), (313, 2.50), (314, 2.50), (315, 2.50), (316, 2.50), (317, 2.50), (318, 2.50), (319, 2.50), (320, 2.50), (321, 2.50), (322, 2.50), (323, 2.50), (324, 2.50), (325, 2.50), (326, 2.50), (327, 2.50), (328, 2.50), (329, 2.50), (330, 2.50), (331, 2.50), (332, 2.50), (333, 2.50), (334, 2.50), (335, 2.50), (336, 2.50), (337, 2.50), (338, 2.50), (339, 2.50), (340, 2.50), (341, 2.50), (342, 2.50), (343, 2.50), (344, 2.50), (345, 2.50), (346, 2.50), (347, 2.50), (348, 2.50), (349, 2.50), (350, 2.50), (351, 2.50), (352, 2.50), (353, 2.50), (354, 2.50), (355, 2.50), (356, 2.50), (357, 2.50), (358, 2.50), (359, 2.50), (360, 2.50), (361, 2.50), (362, 2.50), (363, 2.50), (364, 2.50), (365, 2.50)

DIRETA = 1

DistRelSol = 2/365*PI*(DIA-173)

DSA = 1-UMIDADE/100

ELEVACAO = IF(PROFUNDIDADE_NIVEL_MEDIO_MAR_EM_METROS>0)THEN(DATUM_NMM-PROFUNDIDADE_NIVEL_MEDIO_MAR_EM_METROS)ELSE(DATUM_NMM+ELEVACAO_MSMM)

ELEVACAO_MSMM = 973

ELEV_MIN =

IF(TIPO_DE_HABITAT=1)THEN(ELEVACAO)ELSE(IF(ELEVACAO_MSMM>2*C_SUP_DELTA)THEN(EL E VACAO-C_SUP_DELTA)ELSE(ELEVACAO-ELEVACAO_MSMM/2))

ENERGIA = SOLRADATM/23.9*(0.25+0.5*(10-NUBOSIDADE)/10)-(0.9*(10-NUBOSIDADE)/10+0.1)*(0.34-0.14*SQRT(Pa))*4.903*10^(-9)*TEMP_AR_C^4

ENERGIA_PM = (DELTA*ENERGIA+1.013*ro*D/rA)

Es = 0.6108*EXP(17.27*TEMP_AR_C/(237.3+TEMP_AR_C))

ET_PM = (ENERGIA_PM/GAMMA_PM)/LAMBDA/1000

ET_THORNTHWAITE = GRAPH(TIME)

(1.00, 5.08), (2.00, 5.08), (3.00, 5.08), (4.00, 5.08), (5.00, 5.08), (6.00, 5.08), (7.00, 5.08), (8.00, 5.08), (9.00, 5.08), (10.0, 5.08), (11.0, 5.08), (12.0, 5.08), (13.0, 5.08), (14.0, 5.08), (15.0, 5.08), (16.0, 5.08), (17.0, 5.08), (18.0, 5.08), (19.0, 5.08), (20.0, 5.08), (21.0, 5.08), (22.0, 5.08), (23.0, 5.08), (24.0, 5.08), (25.0, 5.08), (26.0, 5.08), (27.0, 5.08), (28.0, 5.08), (29.0, 5.08), (30.0, 5.08), (31.0, 5.08), (32.0, 5.75), (33.0, 5.75), (34.0, 5.75), (35.0, 5.75), (36.0, 5.75), (37.0, 5.75), (38.0, 5.75), (39.0, 5.75), (40.0, 5.75), (41.0, 5.75), (42.0, 5.75), (43.0, 5.75), (44.0, 5.75), (45.0, 5.75), (46.0, 5.75), (47.0, 5.75), (48.0, 5.75), (49.0, 5.75), (50.0, 5.75), (51.0, 5.75), (52.0, 5.75), (53.0, 5.75), (54.0, 5.75), (55.0, 5.75), (56.0, 5.75), (57.0, 5.75), (58.0, 5.75), (59.0, 5.75), (60.0, 5.48), (61.0, 5.48), (62.0, 5.48), (63.0, 5.48), (64.0, 5.48), (65.0, 5.48), (66.0, 5.48), (67.0, 5.48), (68.0, 5.48), (69.0, 5.48), (70.0, 5.48), (71.0, 5.48), (72.0, 5.48), (73.0, 5.48), (74.0, 5.48), (75.0, 5.48), (76.0, 5.48), (77.0, 5.48), (78.0, 5.48), (79.0, 5.48), (80.0, 5.48), (81.0, 5.48), (82.0, 5.48), (83.0, 5.48), (84.0, 5.48), (85.0, 5.48), (86.0, 5.48), (87.0, 5.48), (88.0, 5.48), (89.0, 5.48), (90.0, 5.48), (91.0, 4.40), (92.0, 4.40), (93.0, 4.40), (94.0, 4.40), (95.0, 4.40), (96.0, 4.40), (97.0, 4.40), (98.0, 4.40), (99.0, 4.40), (100, 4.40), (101, 4.40), (102, 4.40), (103, 4.40), (104, 4.40), (105, 4.40), (106, 4.40), (107, 4.40), (108, 4.40), (109, 4.40), (110, 4.40), (111, 4.40), (112, 4.40), (113, 4.40), (114, 4.40), (115, 4.40), (116, 4.40), (117, 4.40), (118, 4.40), (119, 4.40), (120, 4.40), (121, 4.91), (122, 4.91), (123, 4.91), (124, 4.91), (125, 4.91), (126, 4.91), (127, 4.91), (128, 4.91), (129, 4.91), (130, 4.91), (131, 4.91), (132, 4.91), (133, 4.91), (134, 4.91), (135, 4.91), (136, 4.91), (137, 4.91), (138, 4.91), (139, 4.91), (140, 4.91), (141, 4.91), (142, 4.91), (143, 4.91), (144, 4.91), (145, 4.91), (146, 4.91), (147, 4.91), (148, 4.91), (149, 4.91), (150, 4.91), (151, 4.91), (152, 5.58), (153, 5.58), (154, 5.58), (155, 5.58), (156, 5.58), (157, 5.58), (158, 5.58), (159, 5.58), (160, 5.58), (161, 5.58), (162, 5.58), (163, 5.58), (164,

5.58), (165, 5.58), (166, 5.58), (167, 5.58), (168, 5.58), (169, 5.58), (170, 5.58), (171, 5.58), (172, 5.58), (173, 5.58), (174, 5.58), (175, 5.58), (176, 5.58), (177, 5.58), (178, 5.58), (179, 5.58), (180, 5.58), (181, 5.58), (182, 6.56), (183, 6.56), (184, 6.56), (185, 6.56), (186, 6.56), (187, 6.56), (188, 6.56), (189, 6.56), (190, 6.56), (191, 6.56), (192, 6.56), (193, 6.56), (194, 6.56), (195, 6.56), (196, 6.56), (197, 6.56), (198, 6.56), (199, 6.56), (200, 6.56), (201, 6.56), (202, 6.56), (203, 6.56), (204, 6.56), (205, 6.56), (206, 6.56), (207, 6.56), (208, 6.56), (209, 6.56), (210, 6.56), (211, 6.56), (212, 6.56), (213, 6.86), (214, 6.86), (215, 6.86), (216, 6.86), (217, 6.86), (218, 6.86), (219, 6.86), (220, 6.86), (221, 6.86), (222, 6.86), (223, 6.86), (224, 6.86), (225, 6.86), (226, 6.86), (227, 6.86), (228, 6.86), (229, 6.86), (230, 6.86), (231, 6.86), (232, 6.86), (233, 6.86), (234, 6.86), (235, 6.86), (236, 6.86), (237, 6.86), (238, 6.86), (239, 6.86), (240, 6.86), (241, 6.86), (242, 6.86), (243, 6.86), (244, 6.25), (245, 6.25), (246, 6.25), (247, 6.25), (248, 6.25), (249, 6.25), (250, 6.25), (251, 6.25), (252, 6.25), (253, 6.25), (254, 6.25), (255, 6.25), (256, 6.25), (257, 6.25), (258, 6.25), (259, 6.25), (260, 6.25), (261, 6.25), (262, 6.25), (263, 6.25), (264, 6.25), (265, 6.25), (266, 6.25), (267, 6.25), (268, 6.25), (269, 6.25), (270, 6.25), (271, 6.25), (272, 6.25), (273, 6.25), (274, 6.60), (275, 6.60), (276, 6.60), (277, 6.60), (278, 6.60), (279, 6.60), (280, 6.60), (281, 6.60), (282, 6.60), (283, 6.60), (284, 6.60), (285, 6.60), (286, 6.60), (287, 6.60), (288, 6.60), (289, 6.60), (290, 6.60), (291, 6.60), (292, 6.60), (293, 6.60), (294, 6.60), (295, 6.60), (296, 6.60), (297, 6.60), (298, 6.60), (299, 6.60), (300, 6.60), (301, 6.60), (302, 6.60), (303, 6.60), (304, 6.60), (305, 5.91), (306, 5.91), (307, 5.91), (308, 5.91), (309, 5.91), (310, 5.91), (311, 5.91), (312, 5.91), (313, 5.91), (314, 5.91), (315, 5.91), (316, 5.91), (317, 5.91), (318, 5.91), (319, 5.91), (320, 5.91), (321, 5.91), (322, 5.91), (323, 5.91), (324, 5.91), (325, 5.91), (326, 5.91), (327, 5.91), (328, 5.91), (329, 5.91), (330, 5.91), (331, 5.91), (332, 5.91), (333, 5.91), (334, 5.91), (335, 5.14), (336, 5.14), (337, 5.14), (338, 5.14), (339, 5.14), (340, 5.14), (341, 5.14), (342, 5.14), (343, 5.14), (344, 5.14), (345, 5.14), (346, 5.14), (347, 5.14), (348, 5.14), (349, 5.14), (350, 5.14), (351, 5.14), (352, 5.14), (353, 5.14), (354, 5.14), (355, 5.14), (356, 5.14), (357, 5.14), (358, 5.14), (359, 5.14), (360, 5.14), (361, 5.14), (362, 5.14), (363, 5.14), (364, 5.14), (365, 5.14)

EVAPORACAO =

IF(INDIRETA)THEN(C_EVAPORACAO*SOLRADGR/585*CW*CT*CH)ELSE(CONVERSAO_EVAPORACAO)

EVAPORACAO_ZONA_NAO_SATURADA =

C_AJUSTE_DA_EVAPORACAO_ZONA_NAO_SATURADA*EVAPORACAO*(1-MIN(1,IAF))*UMIDADE_RELATIVA_ZONA_NAO_SATURADA

EVAPOTRANSPIRACAO__POTENCIAL =

IF(THORNTHWAITE)THEN(CONVERSAO_EVAPOTRANSPIRACAO)ELSE(IF(PENMAN_MONTHLITH)THEN(ET_PM)ELSE(0))

FRACAO_TRANSPIRACAO_NA_ZONA_NAO_SATURADA =

IF(PROFUNDIDADE_RAIZES_EM_METROS+0.1<PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA)THEN(1)ELSE(IF(PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA>0)THEN(AGUA_DISPONIVEL_RAIZES*(PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA/(PROFUNDIDADE_RAIZES_EM_METROS+INSAT_CAPILAR)))ELSE(0))

GAMMA = 0.0016286*P/LAMBDA

GAMMA_PM = (DELTA+GAMMA*(1+rS/rA))

IAF = GRAPH(DIA)

(1.00, 5.45), (2.00, 5.45), (3.00, 5.45), (4.00, 5.45), (5.00, 5.45), (6.00, 5.45), (7.00, 5.45), (8.00, 5.45), (9.00, 5.45), (10.0, 5.45), (11.0, 5.45), (12.0, 5.45), (13.0, 5.45), (14.0, 5.45), (15.0, 5.45), (16.0, 5.45), (17.0, 5.45), (18.0, 5.45), (19.0, 5.45), (20.0, 5.45), (21.0, 5.45), (22.0, 5.45), (23.0, 5.45), (24.0, 5.45), (25.0, 5.45), (26.0, 5.45), (27.0, 5.45), (28.0, 5.45), (29.0, 5.45), (30.0, 5.45), (31.0, 5.45), (32.0, 5.45), (33.0, 5.45), (34.0, 5.45), (35.0, 5.45), (36.0, 5.45), (37.0, 5.45), (38.0, 5.45), (39.0, 5.45), (40.0, 5.45), (41.0, 5.45), (42.0, 5.45), (43.0, 5.45), (44.0, 5.45), (45.0, 5.45), (46.0, 5.45), (47.0, 5.45), (48.0, 5.45), (49.0, 5.45), (50.0, 5.45), (51.0, 5.45), (52.0, 5.45), (53.0, 5.45), (54.0, 5.45), (55.0, 5.45), (56.0, 5.45), (57.0, 5.45), (58.0, 5.45), (59.0, 5.45), (60.0, 5.45), (61.0, 5.45), (62.0, 5.45), (63.0, 5.45), (64.0, 5.45), (65.0, 5.45), (66.0, 5.45), (67.0, 5.45), (68.0, 5.45), (69.0, 5.45), (70.0, 5.45), (71.0, 5.45), (72.0, 5.45), (73.0, 5.45), (74.0, 5.45), (75.0, 5.45), (76.0, 5.45), (77.0, 5.45), (78.0, 5.45), (79.0, 5.45), (80.0, 5.45), (81.0, 5.45), (82.0, 5.45), (83.0, 5.45), (84.0, 5.45), (85.0, 5.45), (86.0, 5.45), (87.0, 5.45), (88.0, 5.45), (89.0, 5.45), (90.0, 5.45), (91.0, 5.45), (92.0, 5.45), (93.0, 5.45), (94.0, 5.45), (95.0, 5.45), (96.0, 5.45), (97.0, 5.45), (98.0, 5.45), (99.0, 5.45), (100, 5.45), (101, 5.45), (102, 5.45), (103, 5.45), (104, 5.45), (105, 5.45), (106, 5.45), (107, 5.45), (108, 5.45), (109, 5.45), (110, 5.45), (111, 5.45), (112, 5.45), (113, 5.45), (114, 5.45), (115, 5.45), (116, 5.45), (117, 5.45), (118, 5.45), (119, 5.45), (120, 5.45), (121, 5.45),

```

(122, 5.45), (123, 5.45), (124, 5.45), (125, 5.45), (126, 5.45), (127, 5.45), (128, 5.45), (129, 5.45), (130,
5.45), (131, 5.45), (132, 5.45), (133, 5.45), (134, 5.45), (135, 5.45), (136, 5.45), (137, 5.45), (138, 5.45),
(139, 5.45), (140, 5.45), (141, 5.45), (142, 5.45), (143, 5.45), (144, 5.45), (145, 5.45), (146, 5.45), (147,
5.45), (148, 5.45), (149, 5.45), (150, 5.45), (151, 5.45), (152, 5.45), (153, 5.45), (154, 5.45), (155, 5.45),
(156, 5.45), (157, 5.45), (158, 5.45), (159, 5.45), (160, 5.45), (161, 5.45), (162, 5.45), (163, 5.45), (164,
5.45), (165, 5.45), (166, 5.45), (167, 5.45), (168, 5.45), (169, 5.45), (170, 5.45), (171, 5.45), (172, 5.45),
(173, 5.45), (174, 5.45), (175, 5.45), (176, 5.45), (177, 5.45), (178, 5.45), (179, 5.45), (180, 5.45), (181,
5.45), (182, 5.45), (183, 5.45), (184, 5.45), (185, 5.45), (186, 5.45), (187, 5.45), (188, 5.45), (189, 5.45),
(190, 5.45), (191, 5.45), (192, 5.45), (193, 5.45), (194, 5.45), (195, 5.45), (196, 5.45), (197, 5.45), (198,
5.45), (199, 5.45), (200, 5.45), (201, 5.45), (202, 5.45), (203, 5.45), (204, 5.45), (205, 5.45), (206, 5.45),
(207, 5.45), (208, 5.45), (209, 5.45), (210, 5.45), (211, 5.45), (212, 5.45), (213, 5.45), (214, 5.45), (215,
5.45), (216, 5.45), (217, 5.45), (218, 5.45), (219, 5.45), (220, 5.45), (221, 5.45), (222, 5.45), (223, 5.45),
(224, 5.45), (225, 5.45), (226, 5.45), (227, 5.45), (228, 5.45), (229, 5.45), (230, 5.45), (231, 5.45), (232,
5.45), (233, 5.45), (234, 5.45), (235, 5.45), (236, 5.45), (237, 5.45), (238, 5.45), (239, 5.45), (240, 5.45),
(241, 5.45), (242, 5.45), (243, 5.45), (244, 5.45), (245, 5.45), (246, 5.45), (247, 5.45), (248, 5.45), (249,
5.45), (250, 5.45), (251, 5.45), (252, 5.45), (253, 5.45), (254, 5.45), (255, 5.45), (256, 5.45), (257, 5.45),
(258, 5.45), (259, 5.45), (260, 5.45), (261, 5.45), (262, 5.45), (263, 5.45), (264, 5.45), (265, 5.45), (266,
5.45), (267, 5.45), (268, 5.45), (269, 5.45), (270, 5.45), (271, 5.45), (272, 5.45), (273, 5.45), (274, 5.45),
(275, 5.45), (276, 5.45), (277, 5.45), (278, 5.45), (279, 5.45), (280, 5.45), (281, 5.45), (282, 5.45), (283,
5.45), (284, 5.45), (285, 5.45), (286, 5.45), (287, 5.45), (288, 5.45), (289, 5.45), (290, 5.45), (291, 5.45),
(292, 5.45), (293, 5.45), (294, 5.45), (295, 5.45), (296, 5.45), (297, 5.45), (298, 5.45), (299, 5.45), (300,
5.45), (301, 5.45), (302, 5.45), (303, 5.45), (304, 5.45), (305, 5.45), (306, 5.45), (307, 5.45), (308, 5.45),
(309, 5.45), (310, 5.45), (311, 5.45), (312, 5.45), (313, 5.45), (314, 5.45), (315, 5.45), (316, 5.45), (317,
5.45), (318, 5.45), (319, 5.45), (320, 5.45), (321, 5.45), (322, 5.45), (323, 5.45), (324, 5.45), (325, 5.45),
(326, 5.45), (327, 5.45), (328, 5.45), (329, 5.45), (330, 5.45), (331, 5.45), (332, 5.45), (333, 5.45), (334,
5.45), (335, 5.45), (336, 5.45), (337, 5.45), (338, 5.45), (339, 5.45), (340, 5.45), (341, 5.45), (342, 5.45),
(343, 5.45), (344, 5.45), (345, 5.45), (346, 5.45), (347, 5.45), (348, 5.45), (349, 5.45), (350, 5.45), (351,
5.45), (352, 5.45), (353, 5.45), (354, 5.45), (355, 5.45), (356, 5.45), (357, 5.45), (358, 5.45), (359, 5.45),
(360, 5.45), (361, 5.45), (362, 5.45), (363, 5.45), (364, 5.45), (365, 5.45)
INDIRETA = 1
INFILTRACAO = MIN(POTENCIAL_DE_INFILTRACAO,PRECIPITACAO_LIQUIDA)
INFILTRACAO_REGULAR =
IF(DE_AGUA_SUPERFICIAL_A_ZONA_SATURADA=CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA)THEN(0
)ELSE(MAX(CAPACIDADE_ZONA_NAO_SATURADA-INFILTRACAO*DT,0))
INSAT_CAPILAR = EXP(-10*MAX(PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA-
PROFUNDIDADE_RAIZES_EM_METROS,0))
INSAT_EXC_H% = MAX(0,INSAT_HUM_FRAC-CAPACIDADE_DE_CAMPO)
INSAT_HUM_FRAC =
IF(PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA>0)THEN(ZONA_NAO_SATURADA/PROFUNDIDADE_Z
ONA_NAO_SATURADA)ELSE(0)
INSAT_TAXA_PERC =
2*CONDUTIVIDADE_VERTICAL*POROSIDADE_D*INSAT_EXC_H%^0.4/((POROSIDADE_D-
CAPACIDADE_DE_CAMPO)^0.4+INSAT_EXC_H%^0.4)
INTERCEPTACAO =
MIN(PRECIPITACAO_TOTAL,MAX(C_INTERCEPCAO_DOS_GALHOS*PRECIPITACAO_TOTAL,C_INT
ERCEPCAO_DO_DOSSEL*IAF))
LAMBDA = 2.501-0.002361*(TEMP_AR_C-3)
LatGrausDec = -22.855
LatRadian = (PI/180)*LatGrausDec
MAX_AGUA_SAT = ELEVACAO*POROSIDADE_D
NUBOSIDADE = IF(PRECIPITACAO>0)THEN(MAX(0,10-
1.155*(Pa/(PRECIPITACAO*1000*30))^0.5))ELSE(0)
P = 101.3
Pa = UMIDADE*6.1078*EXP(17.269*TEMP_AR_C/(TEMP_AR_C+237.3))
PENMAN_MONTHEITH = 1
POROSIDADE = POROSIDADE_D+TIPO_SOLO*0.0

```

```

POROSIDADE_D = IF TEXTURA[AREIA]=1 THEN 0.395 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARENOSO]=1 THEN 0.41 ELSE
IF TEXTURA[ARENOSO_FRANCO]=1 THEN 0.435 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_LIMOSO]=1 THEN 0.485 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO]=1 THEN 0.451 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARENO_ARGILOSO]=1 THEN 0.42 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_LIMO_ARGILOSO]=1 THEN 0.477 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARGILOSO]=1 THEN 0.476 ELSE
IF TEXTURA[ARGILO_ARENOSO]=1 THEN 0.426 ELSE
IF TEXTURA[ARGILO_LIMOSO]=1 THEN 0.492 ELSE
IF TEXTURA[ARGILA]=1 THEN 0.482 ELSE
IF TEXTURA[ORIGINAL]=1 THEN 0.41 ELSE 0
POTENCIAL_DE_INFILTRACAO =
C_INFILTRACAO*C_INFILTRACAO_POR_HABITAT*TAXAS_INFILTRACAO_NO_SOLO/(IF(C_DECLIV
DADES>0)THEN(TAXAS_INFILTRACAO_NO_SOLO)ELSE(1))
PRECIPITACAO = CHUVA_CONV*PRECIPITACAO_EM_MM
PRECIPITACAO_EM_MM = GRAPH(DIA)
(1.00, 0.00), (2.00, 0.3), (3.00, 6.90), (4.00, 3.80), (5.00, 1.30), (6.00, 26.9), (7.00, 7.40), (8.00,
1.80), (9.00, 0.00), (10.0, 0.00), (11.0, 0.2), (12.0, 0.00), (13.0, 38.6), (14.0, 4.00), (15.0, 11.4), (16.0,
7.60), (17.0, 0.00), (18.0, 14.0), (19.0, 0.00), (20.0, 21.8), (21.0, 13.2), (22.0, 1.00), (23.0, 0.00), (24.0,
0.7), (25.0, 0.00), (26.0, 0.00), (27.0, 0.00), (28.0, 1.30), (29.0, 9.90), (30.0, 31.5), (31.0, 5.10), (32.0,
0.00), (33.0, 0.00), (34.0, 32.0), (35.0, 3.00), (36.0, 0.00), (37.0, 10.7), (38.0, 5.60), (39.0, 13.2), (40.0,
0.00), (41.0, 8.90), (42.0, 5.60), (43.0, 0.00), (44.0, 8.60), (45.0, 0.00), (46.0, 0.00), (47.0, 0.2), (48.0,
0.00), (49.0, 1.30), (50.0, 7.40), (51.0, 16.3), (52.0, 7.10), (53.0, 2.50), (54.0, 0.5), (55.0, 23.1), (56.0,
9.40), (57.0, 0.00), (58.0, 0.00), (59.0, 0.00), (60.0, 0.00), (61.0, 1.80), (62.0, 42.4), (63.0, 1.80), (64.0,
0.00), (65.0, 0.00), (66.0, 0.00), (67.0, 0.00), (68.0, 9.40), (69.0, 26.2), (70.0, 0.5), (71.0, 0.2), (72.0, 18.8),
(73.0, 26.7), (74.0, 25.1), (75.0, 1.30), (76.0, 5.10), (77.0, 8.60), (78.0, 61.5), (79.0, 6.60), (80.0, 0.00),
(81.0, 0.8), (82.0, 0.00), (83.0, 0.00), (84.0, 30.0), (85.0, 7.90), (86.0, 0.00), (87.0, 1.80), (88.0, 8.10),
(89.0, 0.00), (90.0, 0.00), (91.0, 0.00), (92.0, 0.00), (93.0, 0.00), (94.0, 0.5), (95.0, 30.2), (96.0, 0.00),
(97.0, 0.00), (98.0, 26.7), (99.0, 5.30), (100, 0.00), (101, 0.2), (102, 11.7), (103, 0.2), (104, 7.90), (105,
5.30), (106, 20.6), (107, 0.2), (108, 6.60), (109, 0.3), (110, 0.00), (111, 3.80), (112, 7.40), (113, 40.9),
(114, 2.00), (115, 0.00), (116, 0.00), (117, 0.00), (118, 0.00), (119, 0.00), (120, 0.00), (121, 35.1), (122,
0.3), (123, 0.00), (124, 72.4), (125, 0.3), (126, 0.00), (127, 0.00), (128, 0.00), (129, 0.00), (130, 0.00),
(131, 0.00), (132, 0.00), (133, 0.00), (134, 0.00), (135, 0.00), (136, 0.00), (137, 0.3), (138, 0.00), (139,
0.00), (140, 0.00), (141, 0.00), (142, 0.00), (143, 0.00), (144, 0.00), (145, 0.00), (146, 0.00), (147, 0.00),
(148, 0.00), (149, 0.00), (150, 0.00), (151, 2.30), (152, 2.30), (153, 17.5), (154, 0.5), (155, 0.00), (156,
25.9), (157, 6.80), (158, 0.3), (159, 0.00), (160, 0.00), (161, 0.00), (162, 0.00), (163, 0.00), (164, 0.00),
(165, 0.00), (166, 0.00), (167, 0.00), (168, 12.5), (169, 0.00), (170, 0.00), (171, 0.3), (172, 0.00), (173,
0.00), (174, 0.00), (175, 1.50), (176, 0.00), (177, 0.8), (178, 0.00), (179, 0.00), (180, 0.00), (181, 0.00),
(182, 0.00), (183, 0.00), (184, 0.1), (185, 0.00), (186, 0.00), (187, 0.00), (188, 0.00), (189, 0.3), (190,
0.00), (191, 0.00), (192, 0.00), (193, 0.00), (194, 0.00), (195, 0.00), (196, 0.00), (197, 0.00), (198, 0.00),
(199, 0.00), (200, 0.00), (201, 0.00), (202, 0.00), (203, 0.00), (204, 0.00), (205, 0.00), (206, 0.00), (207,
0.00), (208, 0.00), (209, 0.00), (210, 0.00), (211, 0.00), (212, 0.00), (213, 0.00), (214, 0.00), (215, 0.00),
(216, 6.60), (217, 16.5), (218, 0.00), (219, 0.3), (220, 0.3), (221, 44.2), (222, 6.40), (223, 8.90), (224,
0.00), (225, 0.00), (226, 0.00), (227, 0.00), (228, 0.00), (229, 0.00), (230, 0.00), (231, 0.00), (232, 0.00),
(233, 0.00), (234, 0.00), (235, 0.00), (236, 0.00), (237, 0.00), (238, 0.00), (239, 0.00), (240, 0.00), (241,
0.00), (242, 0.00), (243, 1.30), (244, 0.00), (245, 0.00), (246, 0.00), (247, 0.00), (248, 0.00), (249, 0.00),
(250, 0.00), (251, 0.00), (252, 0.00), (253, 0.00), (254, 0.00), (255, 0.00), (256, 0.00), (257, 0.00), (258,
9.40), (259, 0.00), (260, 0.00), (261, 0.00), (262, 0.00), (263, 0.00), (264, 0.00), (265, 18.0), (266, 10.4),
(267, 0.00), (268, 0.00), (269, 0.00), (270, 4.30), (271, 3.80), (272, 0.00), (273, 0.00), (274, 0.00), (275,
0.00), (276, 24.4), (277, 0.3), (278, 0.00), (279, 0.00), (280, 13.2), (281, 7.40), (282, 0.5), (283, 0.00),
(284, 0.00), (285, 0.00), (286, 2.30), (287, 0.8), (288, 0.00), (289, 0.00), (290, 0.00), (291, 0.00), (292,
0.00), (293, 15.8), (294, 12.5), (295, 0.00), (296, 2.00), (297, 7.40), (298, 0.00), (299, 0.3), (300, 0.00),
(301, 0.00), (302, 0.00), (303, 0.00), (304, 46.7), (305, 0.3), (306, 0.00), (307, 0.00), (308, 8.60), (309,
0.3), (310, 0.00), (311, 0.00), (312, 25.4), (313, 7.40), (314, 0.5), (315, 0.00), (316, 18.3), (317, 4.10),
(318, 20.6), (319, 0.00), (320, 7.10), (321, 0.00), (322, 0.00), (323, 0.00), (324, 0.00), (325, 0.00), (326,

```

```

0.00), (327, 2.50), (328, 32.0), (329, 5.30), (330, 0.00), (331, 3.60), (332, 10.2), (333, 0.00), (334, 0.00),
(335, 0.00), (336, 0.00), (337, 0.00), (338, 35.3), (339, 0.00), (340, 0.00), (341, 0.00), (342, 0.00), (343,
0.00), (344, 0.00), (345, 0.00), (346, 14.7), (347, 4.60), (348, 1.00), (349, 0.00), (350, 1.80), (351, 0.3),
(352, 40.6), (353, 0.3), (354, 4.30), (355, 32.0), (356, 17.5), (357, 17.8), (358, 2.00), (359, 7.10), (360,
11.4), (361, 7.10), (362, 0.3), (363, 0.00), (364, 0.00), (365, 0.00)
PRECIPITACAO_HORIZONTAL = PRECIPITACAO_VERTICAL*0.17*DIAS_COM_NEBLINA
PRECIPITACAO_LIQUIDA = PRECIPITACAO_TOTAL-INTERCEPTACAO
PRECIPITACAO_TOTAL = PRECIPITACAO_VERTICAL+PRECIPITACAO_HORIZONTAL
PRECIPITACAO_VERTICAL = IF(TEMP_AR_C>0)THEN(PRECIPITACAO)ELSE(0)
PROFUNDIDADE_NIVEL_MEDIO_MAR_EM_METROS = 0
PROFUNDIDADE_RAIZES_EM_METROS = 7
PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA = MAX(ELEVACAO-SAT_NIV_MAX,0)
PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA_NUM_PERIODO_ANTERIOR =
DELAY(PROFUNDIDADE_ZONA_NAO_SATURADA,DT)
PROFUNDIDADE_LENCOL_FREATICO_EM_METROS = 25
rA = if ALTURA_VEGETACAO > 0.001 THEN LOGN((25/ALTURA_VEGETACAO-
0.67)/0.123)*LOGN((25/ALTURA_VEGETACAO-0.67)/0.0123)/0.41/0.41/VELOCIDADE_VENTO/3.6 else
10^10
ro = 3.486*P/(275+TEMP_AR_C)
rS = IF IAF>0.01 THEN 4/IAF ELSE 10^10
SAT_ESCOAMENTO = ELEV_MIN*POROSIDADE_D
SAT_NIV_MAX = ZONA_SATURADA/POROSIDADE_D
SOLRADTM =
(24*60/PI)*0.082*DistRelSol*(AngRadSol*SIN(LatRadian)*SIN(DeclinSolar)+COS(LatRadian)*COS(Declin
Solar)*SIN(AngRadSol))
SOLRADGR = 0.55*SOLRADTM*(1-0.05*NUBOSIDADE)
TABLA_DE_AGUA = PROFUNDIDADE_LENCOL_FREATICO_EM_METROS+DATUM_NMM
TAM_CELULA = 40000
TAXAS_INFILTRACAO_NO_SOLO = IF TEXTURA[AREIA] OR TEXTURA[FRANCO_ARENOSO]
OR TEXTURA[ARENOSO_FRANCO]=1 THEN 16.09411765 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_LIMOSO] OR TEXTURA[FRANCO]=1 THEN 10.72882353 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_ARENO_ARGILOSO]=1 THEN 5.347058824 ELSE
IF TEXTURA[FRANCO_LIMO_ARGILOSO] OR TEXTURA[FRANCO_ARGILOSO] OR
TEXTURA[ARGILO_ARENOSO] OR TEXTURA[ARGILO_LIMOSO] OR TEXTURA[ARGILA]=1 THEN
1.832941176 ELSE
IF TEXTURA[ORIGINAL]=1 THEN 4 ELSE 0
TEMP_AR_C = MAX(0,(TEMP_MAX_AR_C+TEMP_MIN_AR_C)/2)
TEMP_MAX_AR_C = GRAPH(DIA)
(1.00, 30.5), (2.00, 27.4), (3.00, 30.3), (4.00, 31.4), (5.00, 27.8), (6.00, 28.4), (7.00, 27.5), (8.00,
32.6), (9.00, 30.3), (10.0, 30.9), (11.0, 28.8), (12.0, 28.6), (13.0, 24.0), (14.0, 25.6), (15.0, 26.6), (16.0,
28.0), (17.0, 27.6), (18.0, 27.9), (19.0, 29.2), (20.0, 26.0), (21.0, 21.3), (22.0, 21.8), (23.0, 22.0), (24.0,
25.1), (25.0, 23.6), (26.0, 21.5), (27.0, 23.7), (28.0, 20.8), (29.0, 21.4), (30.0, 26.9), (31.0, 29.4), (32.0,
31.0), (33.0, 31.5), (34.0, 26.5), (35.0, 24.3), (36.0, 25.7), (37.0, 22.9), (38.0, 28.4), (39.0, 28.9), (40.0,
30.5), (41.0, 30.3), (42.0, 30.7), (43.0, 31.9), (44.0, 29.8), (45.0, 29.6), (46.0, 28.9), (47.0, 28.7), (48.0,
30.8), (49.0, 28.5), (50.0, 28.4), (51.0, 29.2), (52.0, 28.0), (53.0, 27.8), (54.0, 27.5), (55.0, 25.2), (56.0,
27.3), (57.0, 27.5), (58.0, 26.8), (59.0, 26.0), (60.0, 25.7), (61.0, 27.7), (62.0, 30.2), (63.0, 29.7), (64.0,
29.2), (65.0, 29.3), (66.0, 30.2), (67.0, 32.3), (68.0, 30.8), (69.0, 29.6), (70.0, 30.5), (71.0, 27.1), (72.0,
28.4), (73.0, 24.7), (74.0, 20.6), (75.0, 18.4), (76.0, 22.7), (77.0, 17.8), (78.0, 29.6), (79.0, 28.5), (80.0,
28.8), (81.0, 28.9), (82.0, 28.0), (83.0, 27.3), (84.0, 28.4), (85.0, 26.8), (86.0, 25.9), (87.0, 28.7), (88.0,
29.1), (89.0, 26.1), (90.0, 23.3), (91.0, 23.5), (92.0, 28.2), (93.0, 28.0), (94.0, 23.7), (95.0, 23.5), (96.0,
22.7), (97.0, 22.4), (98.0, 25.7), (99.0, 28.1), (100, 30.7), (101, 30.9), (102, 29.8), (103, 29.8), (104, 29.9),
(105, 22.0), (106, 21.3), (107, 26.1), (108, 15.7), (109, 23.8), (110, 24.9), (111, 22.7), (112, 25.6), (113,
28.0), (114, 26.9), (115, 26.6), (116, 26.9), (117, 26.9), (118, 27.3), (119, 27.8), (120, 28.2), (121, 17.8),
(122, 17.6), (123, 17.7), (124, 18.1), (125, 20.4), (126, 21.6), (127, 21.9), (128, 22.8), (129, 24.4), (130,
20.4), (131, 19.0), (132, 19.0), (133, 18.1), (134, 19.2), (135, 21.7), (136, 25.6), (137, 26.1), (138, 22.2),
(139, 17.6), (140, 27.6), (141, 26.1), (142, 27.1), (143, 26.5), (144, 26.4), (145, 25.2), (146, 25.2), (147,

```

25.8), (148, 26.2), (149, 27.4), (150, 24.5), (151, 17.8), (152, 13.0), (153, 16.6), (154, 20.7), (155, 23.8), (156, 20.2), (157, 26.5), (158, 27.5), (159, 26.9), (160, 26.1), (161, 26.7), (162, 23.5), (163, 26.5), (164, 26.5), (165, 27.0), (166, 26.3), (167, 25.1), (168, 14.1), (169, 23.0), (170, 25.1), (171, 25.7), (172, 26.6), (173, 24.0), (174, 17.8), (175, 14.7), (176, 15.3), (177, 17.6), (178, 21.5), (179, 23.4), (180, 24.6), (181, 25.0), (182, 25.5), (183, 25.7), (184, 23.9), (185, 24.7), (186, 19.9), (187, 20.9), (188, 25.9), (189, 22.6), (190, 23.2), (191, 21.3), (192, 20.1), (193, 19.5), (194, 22.5), (195, 21.9), (196, 22.9), (197, 24.5), (198, 25.1), (199, 24.4), (200, 24.8), (201, 25.1), (202, 25.3), (203, 26.5), (204, 26.9), (205, 27.9), (206, 24.0), (207, 24.9), (208, 20.1), (209, 27.4), (210, 28.0), (211, 26.6), (212, 26.5), (213, 26.6), (214, 27.4), (215, 23.7), (216, 18.5), (217, 24.7), (218, 28.6), (219, 28.1), (220, 29.6), (221, 18.2), (222, 19.4), (223, 18.7), (224, 28.4), (225, 28.8), (226, 23.3), (227, 23.3), (228, 25.4), (229, 27.2), (230, 28.2), (231, 28.7), (232, 26.3), (233, 27.1), (234, 26.7), (235, 27.2), (236, 21.5), (237, 25.6), (238, 28.2), (239, 27.7), (240, 24.8), (241, 29.2), (242, 29.2), (243, 15.8), (244, 20.8), (245, 26.2), (246, 28.6), (247, 30.2), (248, 30.6), (249, 31.0), (250, 31.0), (251, 23.3), (252, 21.4), (253, 24.1), (254, 32.7), (255, 33.5), (256, 32.3), (257, 23.2), (258, 22.9), (259, 18.4), (260, 19.4), (261, 17.9), (262, 20.0), (263, 22.8), (264, 20.1), (265, 20.4), (266, 20.6), (267, 23.4), (268, 20.7), (269, 24.0), (270, 21.3), (271, 23.1), (272, 22.6), (273, 23.9), (274, 23.6), (275, 31.2), (276, 24.7), (277, 28.2), (278, 29.8), (279, 25.8), (280, 25.8), (281, 22.1), (282, 18.7), (283, 21.0), (284, 22.8), (285, 25.6), (286, 26.3), (287, 31.1), (288, 31.1), (289, 33.4), (290, 32.5), (291, 25.5), (292, 24.1), (293, 19.0), (294, 26.4), (295, 28.4), (296, 27.9), (297, 30.4), (298, 31.2), (299, 33.2), (300, 33.2), (301, 30.2), (302, 25.0), (303, 30.4), (304, 26.7), (305, 24.1), (306, 26.3), (307, 26.1), (308, 28.6), (309, 28.8), (310, 30.2), (311, 25.5), (312, 24.9), (313, 29.4), (314, 31.0), (315, 28.1), (316, 24.5), (317, 25.7), (318, 29.0), (319, 28.1), (320, 31.2), (321, 29.9), (322, 22.8), (323, 25.6), (324, 23.0), (325, 23.4), (326, 24.3), (327, 23.1), (328, 25.4), (329, 25.3), (330, 26.5), (331, 25.7), (332, 26.3), (333, 26.5), (334, 27.3), (335, 27.6), (336, 30.6), (337, 31.0), (338, 26.6), (339, 24.2), (340, 25.9), (341, 28.0), (342, 28.6), (343, 30.6), (344, 31.3), (345, 30.0), (346, 25.8), (347, 19.9), (348, 24.0), (349, 25.3), (350, 26.2), (351, 24.6), (352, 28.5), (353, 26.4), (354, 26.4), (355, 25.6), (356, 25.7), (357, 27.2), (358, 28.7), (359, 30.6), (360, 25.7), (361, 24.4), (362, 24.0), (363, 30.6), (364, 32.3), (365, 28.2)

TEMP_MIN_AR_C = GRAPH(DIA)

(1.00, 19.8), (2.00, 18.8), (3.00, 18.2), (4.00, 17.4), (5.00, 18.8), (6.00, 17.4), (7.00, 16.5), (8.00, 16.0), (9.00, 15.9), (10.0, 17.1), (11.0, 20.0), (12.0, 20.5), (13.0, 18.6), (14.0, 18.9), (15.0, 18.2), (16.0, 15.9), (17.0, 16.1), (18.0, 18.1), (19.0, 19.1), (20.0, 18.9), (21.0, 15.6), (22.0, 15.3), (23.0, 15.3), (24.0, 15.6), (25.0, 17.1), (26.0, 16.1), (27.0, 16.2), (28.0, 15.5), (29.0, 16.3), (30.0, 15.9), (31.0, 17.6), (32.0, 17.3), (33.0, 17.6), (34.0, 18.4), (35.0, 17.9), (36.0, 16.9), (37.0, 17.3), (38.0, 17.3), (39.0, 17.4), (40.0, 16.9), (41.0, 17.9), (42.0, 18.7), (43.0, 18.2), (44.0, 17.7), (45.0, 17.8), (46.0, 18.5), (47.0, 17.8), (48.0, 19.1), (49.0, 20.7), (50.0, 15.3), (51.0, 16.7), (52.0, 18.2), (53.0, 17.6), (54.0, 18.6), (55.0, 19.4), (56.0, 17.6), (57.0, 16.8), (58.0, 17.8), (59.0, 16.0), (60.0, 16.4), (61.0, 18.6), (62.0, 16.8), (63.0, 17.9), (64.0, 17.2), (65.0, 16.1), (66.0, 15.3), (67.0, 16.5), (68.0, 18.2), (69.0, 17.3), (70.0, 17.6), (71.0, 18.5), (72.0, 18.6), (73.0, 19.1), (74.0, 16.5), (75.0, 15.8), (76.0, 16.0), (77.0, 15.7), (78.0, 15.0), (79.0, 16.7), (80.0, 16.8), (81.0, 17.1), (82.0, 18.7), (83.0, 18.1), (84.0, 17.8), (85.0, 17.9), (86.0, 16.5), (87.0, 16.3), (88.0, 14.8), (89.0, 16.4), (90.0, 16.4), (91.0, 14.7), (92.0, 13.5), (93.0, 15.4), (94.0, 16.7), (95.0, 17.2), (96.0, 15.1), (97.0, 15.5), (98.0, 16.5), (99.0, 18.4), (100, 18.8), (101, 19.0), (102, 16.0), (103, 16.8), (104, 15.5), (105, 17.5), (106, 16.1), (107, 16.0), (108, 16.8), (109, 15.7), (110, 15.9), (111, 17.0), (112, 16.7), (113, 16.0), (114, 13.9), (115, 13.1), (116, 13.3), (117, 11.7), (118, 11.7), (119, 13.0), (120, 14.1), (121, 15.1), (122, 12.8), (123, 14.1), (124, 14.5), (125, 11.0), (126, 10.6), (127, 9.30), (128, 6.50), (129, 5.90), (130, 6.90), (131, 12.2), (132, 12.6), (133, 13.1), (134, 13.2), (135, 12.9), (136, 10.9), (137, 11.6), (138, 11.8), (139, 12.3), (140, 13.3), (141, 10.2), (142, 8.80), (143, 10.4), (144, 9.50), (145, 9.60), (146, 10.4), (147, 11.3), (148, 10.2), (149, 10.4), (150, 11.2), (151, 14.1), (152, 9.70), (153, 9.80), (154, 10.5), (155, 10.1), (156, 10.9), (157, 11.7), (158, 11.8), (159, 11.6), (160, 11.9), (161, 13.2), (162, 14.9), (163, 12.1), (164, 12.5), (165, 12.9), (166, 12.7), (167, 12.8), (168, 9.40), (169, 7.40), (170, 7.30), (171, 8.40), (172, 10.2), (173, 12.0), (174, 14.0), (175, 11.6), (176, 10.7), (177, 11.1), (178, 11.5), (179, 11.7), (180, 10.6), (181, 11.0), (182, 10.9), (183, 10.0), (184, 10.0), (185, 13.1), (186, 11.6), (187, 8.10), (188, 8.10), (189, 8.80), (190, 7.60), (191, 7.50), (192, 7.90), (193, 10.2), (194, 9.20), (195, 9.00), (196, 6.90), (197, 6.90), (198, 7.50), (199, 5.40), (200, 5.50), (201, 6.80), (202, 7.90), (203, 8.20), (204, 10.8), (205, 13.9), (206, 10.8), (207, 10.4), (208, 9.90), (209, 10.8), (210, 11.6), (211, 12.7), (212, 11.2), (213, 11.9), (214, 12.4), (215, 13.5), (216, 14.2), (217, 11.0), (218, 11.9), (219, 13.9), (220, 15.5), (221, 15.1), (222, 13.9), (223, 12.8), (224, 11.1), (225, 12.1), (226, 18.3), (227, 14.1), (228, 14.6), (229, 16.5), (230, 15.4), (231, 13.9), (232, 13.2), (233, 12.7), (234, 11.6), (235, 13.4), (236, 14.3), (237, 13.5), (238, 14.0), (239, 12.0), (240, 10.3),

(241, 10.3), (242, 11.9), (243, 11.0), (244, 10.6), (245, 10.0), (246, 10.6), (247, 12.8), (248, 13.0), (249, 14.3), (250, 15.2), (251, 16.5), (252, 13.8), (253, 13.3), (254, 14.2), (255, 18.3), (256, 18.3), (257, 16.7), (258, 13.9), (259, 12.6), (260, 12.4), (261, 11.4), (262, 10.3), (263, 10.2), (264, 10.4), (265, 11.6), (266, 11.0), (267, 7.80), (268, 10.6), (269, 11.3), (270, 12.9), (271, 12.0), (272, 11.8), (273, 10.9), (274, 12.5), (275, 13.4), (276, 15.9), (277, 15.3), (278, 16.6), (279, 17.8), (280, 15.3), (281, 14.6), (282, 14.1), (283, 11.4), (284, 11.8), (285, 11.0), (286, 16.5), (287, 16.1), (288, 18.0), (289, 16.5), (290, 15.6), (291, 16.8), (292, 17.0), (293, 16.1), (294, 15.0), (295, 16.1), (296, 16.7), (297, 17.2), (298, 18.8), (299, 19.4), (300, 18.2), (301, 18.4), (302, 16.8), (303, 16.8), (304, 17.9), (305, 17.6), (306, 15.2), (307, 17.3), (308, 18.3), (309, 15.7), (310, 16.6), (311, 18.2), (312, 17.9), (313, 16.4), (314, 16.2), (315, 17.5), (316, 18.4), (317, 16.6), (318, 16.4), (319, 17.9), (320, 15.7), (321, 16.4), (322, 18.0), (323, 15.9), (324, 14.1), (325, 13.1), (326, 12.9), (327, 15.0), (328, 14.5), (329, 14.9), (330, 15.5), (331, 16.1), (332, 16.5), (333, 15.7), (334, 15.7), (335, 15.9), (336, 15.4), (337, 17.6), (338, 17.1), (339, 12.2), (340, 12.0), (341, 13.0), (342, 13.3), (343, 14.7), (344, 14.0), (345, 18.4), (346, 18.0), (347, 15.9), (348, 14.7), (349, 14.9), (350, 17.1), (351, 16.5), (352, 16.7), (353, 17.3), (354, 16.5), (355, 17.8), (356, 16.7), (357, 17.1), (358, 18.8), (359, 19.8), (360, 18.6), (361, 18.3), (362, 16.3), (363, 16.2), (364, 17.2), (365, 16.4)

TEXTURA[TIPO] = 1

THORNTHWAITE = 1

TIPO_DE_HABITAT = 2

TIPO_SOLO = 1

TRANSPIRACAO =

C_TRANSPIRACAO*MIN(1,IAF)*EVAPOTRANSPIRACAO__POTENCIAL*AGUA_DISPONIVEL_RAIZES
UMIDADE = GRAPH(DIA)

(1.00, 49.0), (2.00, 49.0), (3.00, 49.0), (4.00, 49.0), (5.00, 49.0), (6.00, 49.0), (7.00, 49.0), (8.00, 49.0), (9.00, 49.0), (10.0, 49.0), (11.0, 49.0), (12.0, 49.0), (13.0, 49.0), (14.0, 49.0), (15.0, 49.0), (16.0, 49.0), (17.0, 49.0), (18.0, 49.0), (19.0, 49.0), (20.0, 49.0), (21.0, 49.0), (22.0, 49.0), (23.0, 49.0), (24.0, 49.0), (25.0, 49.0), (26.0, 49.0), (27.0, 49.0), (28.0, 49.0), (29.0, 49.0), (30.0, 49.0), (31.0, 49.0), (32.0, 49.0), (33.0, 49.0), (34.0, 49.0), (35.0, 49.0), (36.0, 49.0), (37.0, 49.0), (38.0, 49.0), (39.0, 49.0), (40.0, 49.0), (41.0, 49.0), (42.0, 49.0), (43.0, 49.0), (44.0, 49.0), (45.0, 49.0), (46.0, 49.0), (47.0, 49.0), (48.0, 49.0), (49.0, 49.0), (50.0, 49.0), (51.0, 49.0), (52.0, 49.0), (53.0, 49.0), (54.0, 49.0), (55.0, 49.0), (56.0, 49.0), (57.0, 49.0), (58.0, 49.0), (59.0, 49.0), (60.0, 49.0), (61.0, 49.0), (62.0, 49.0), (63.0, 49.0), (64.0, 49.0), (65.0, 49.0), (66.0, 49.0), (67.0, 49.0), (68.0, 49.0), (69.0, 49.0), (70.0, 49.0), (71.0, 49.0), (72.0, 49.0), (73.0, 49.0), (74.0, 49.0), (75.0, 49.0), (76.0, 49.0), (77.0, 49.0), (78.0, 49.0), (79.0, 49.0), (80.0, 49.0), (81.0, 49.0), (82.0, 49.0), (83.0, 49.0), (84.0, 49.0), (85.0, 49.0), (86.0, 49.0), (87.0, 49.0), (88.0, 49.0), (89.0, 49.0), (90.0, 49.0), (91.0, 49.0), (92.0, 49.0), (93.0, 49.0), (94.0, 49.0), (95.0, 49.0), (96.0, 49.0), (97.0, 49.0), (98.0, 49.0), (99.0, 49.0), (100, 49.0), (101, 49.0), (102, 49.0), (103, 49.0), (104, 49.0), (105, 49.0), (106, 49.0), (107, 49.0), (108, 49.0), (109, 49.0), (110, 49.0), (111, 49.0), (112, 49.0), (113, 49.0), (114, 49.0), (115, 49.0), (116, 49.0), (117, 49.0), (118, 49.0), (119, 49.0), (120, 49.0), (121, 49.0), (122, 49.0), (123, 49.0), (124, 49.0), (125, 49.0), (126, 49.0), (127, 49.0), (128, 49.0), (129, 49.0), (130, 49.0), (131, 49.0), (132, 49.0), (133, 49.0), (134, 49.0), (135, 49.0), (136, 49.0), (137, 49.0), (138, 49.0), (139, 49.0), (140, 49.0), (141, 49.0), (142, 49.0), (143, 49.0), (144, 49.0), (145, 49.0), (146, 49.0), (147, 49.0), (148, 49.0), (149, 49.0), (150, 49.0), (151, 49.0), (152, 49.0), (153, 49.0), (154, 49.0), (155, 49.0), (156, 49.0), (157, 49.0), (158, 49.0), (159, 49.0), (160, 49.0), (161, 49.0), (162, 49.0), (163, 49.0), (164, 49.0), (165, 49.0), (166, 49.0), (167, 49.0), (168, 49.0), (169, 49.0), (170, 49.0), (171, 49.0), (172, 49.0), (173, 49.0), (174, 49.0), (175, 49.0), (176, 49.0), (177, 49.0), (178, 49.0), (179, 49.0), (180, 49.0), (181, 49.0), (182, 49.0), (183, 49.0), (184, 49.0), (185, 49.0), (186, 49.0), (187, 49.0), (188, 49.0), (189, 49.0), (190, 49.0), (191, 49.0), (192, 49.0), (193, 49.0), (194, 49.0), (195, 49.0), (196, 49.0), (197, 49.0), (198, 49.0), (199, 49.0), (200, 49.0), (201, 49.0), (202, 49.0), (203, 49.0), (204, 49.0), (205, 49.0), (206, 49.0), (207, 49.0), (208, 49.0), (209, 49.0), (210, 49.0), (211, 49.0), (212, 49.0), (213, 49.0), (214, 49.0), (215, 49.0), (216, 49.0), (217, 49.0), (218, 49.0), (219, 49.0), (220, 49.0), (221, 49.0), (222, 49.0), (223, 49.0), (224, 49.0), (225, 49.0), (226, 49.0), (227, 49.0), (228, 49.0), (229, 49.0), (230, 49.0), (231, 49.0), (232, 49.0), (233, 49.0), (234, 49.0), (235, 49.0), (236, 49.0), (237, 49.0), (238, 49.0), (239, 49.0), (240, 49.0), (241, 49.0), (242, 49.0), (243, 49.0), (244, 49.0), (245, 49.0), (246, 49.0), (247, 49.0), (248, 49.0), (249, 49.0), (250, 49.0), (251, 49.0), (252, 49.0), (253, 49.0), (254, 49.0), (255, 49.0), (256, 49.0), (257, 49.0), (258, 49.0), (259, 49.0), (260, 49.0), (261, 49.0), (262, 49.0), (263, 49.0), (264, 49.0), (265, 49.0), (266, 49.0), (267, 49.0), (268, 49.0), (269, 49.0), (270, 49.0), (271, 49.0), (272, 49.0), (273, 49.0), (274, 49.0), (275, 49.0), (276, 49.0), (277, 49.0), (278, 49.0), (279, 49.0), (280, 49.0), (281, 49.0), (282, 49.0), (283,

49.0), (284, 49.0), (285, 49.0), (286, 49.0), (287, 49.0), (288, 49.0), (289, 49.0), (290, 49.0), (291, 49.0), (292, 49.0), (293, 49.0), (294, 49.0), (295, 49.0), (296, 49.0), (297, 49.0), (298, 49.0), (299, 49.0), (300, 49.0), (301, 49.0), (302, 49.0), (303, 49.0), (304, 49.0), (305, 49.0), (306, 49.0), (307, 49.0), (308, 49.0), (309, 49.0), (310, 49.0), (311, 49.0), (312, 49.0), (313, 49.0), (314, 49.0), (315, 49.0), (316, 49.0), (317, 49.0), (318, 49.0), (319, 49.0), (320, 49.0), (321, 49.0), (322, 49.0), (323, 49.0), (324, 49.0), (325, 49.0), (326, 49.0), (327, 49.0), (328, 49.0), (329, 49.0), (330, 49.0), (331, 49.0), (332, 49.0), (333, 49.0), (334, 49.0), (335, 49.0), (336, 49.0), (337, 49.0), (338, 49.0), (339, 49.0), (340, 49.0), (341, 49.0), (342, 49.0), (343, 49.0), (344, 49.0), (345, 49.0), (346, 49.0), (347, 49.0), (348, 49.0), (349, 49.0), (350, 49.0), (351, 49.0), (352, 49.0), (353, 49.0), (354, 49.0), (355, 49.0), (356, 49.0), (357, 49.0), (358, 49.0), (359, 49.0), (360, 49.0), (361, 49.0), (362, 49.0), (363, 49.0), (364, 49.0), (365, 49.0)

$$\text{UMIDADE_RELATIVA_ZONA_NAO_SATURADA} = \text{INSAT_HUM_FRAC} / \text{POROSIDADE_D}$$

VELOCIDADE_VENTO = GRAPH(DIA)

[illegible]


```
X = 1-(TAN(LatRadian))^2*(TAN(DeclinSolar))^2  
ZONA_SUPERFICIAL_EM_METROS = 0
```

Anexo D – Parâmetros do MOVA

Fatores	Variáveis	Unidade de medida	Escala disponível	Descrição das variáveis	Fonte Principal	Fontes Alternativas de informação			Instruções e observações	
Clima	Temperatura média diária do ar	°C	Local	É a média aritmética das temperaturas medidas cada 10 min. num intervalo de 24 hrs.	Estação Meteorológica com captura de neblina ou captura de precipitação horizontal e medidores de radiação solar no local.	Extrema Prefeitura. Bases de dados meteorológicas do IAC.	EMA's	Estimar com base em outros estudos (ver instruções)	Bibliografia de locais semelhantes, Journal of Climate.	Utilizar dados das estações mais próximas, considerando o tipo de vegetação e altitude. Se os dados de neblina são inexistentes pode-se obtê-los pelo produto do numero de dias registrados com neblina por 17% da precipitação vertical diária
	Precipitação Vertical	mm d ¹		É a quantidade de água derivada da precipitação em forma de chuva vertical medida nas estações meteorológicas-EMA's.						
	Precipitação Horizontal	mm d ¹		É a precipitação gerada pela neblina						
	Evaporação direta	mm d ¹		Dados obtidos na estação de monitoramento. São os milímetros de água que se incorporam à atmosfera por efeito combinado do vento e da temperatura. Essa informação se utiliza no caso de se considerar os valores diretos da evaporação no modelo.						
	Velocidade do Vento	Km hr ¹		É a velocidade do vento medida a 25 m de altura, basicamente é a média aritmética das velocidades medidas num intervalo de 24 hrs.						

	Umidade Relativa do Ar	%		Porcentagem de umidade (0-100). No caso de se estimar a evaporação (H_E) indiretamente pelo método de Christiansen (1968), este dado se faz necessário.						
	Radiação solar	$Cal\ d^{-1}$		A radiação solar consiste nos valores médios medidos num intervalo de 10 minutos (fazer medições a cada minuto); utiliza a media aritmética dos valores registrados num intervalo de 24 horas.						
Solo	Tipo de Solo	s/u	250.000	Tipo de solo segundo sua classificação local.	Carta Edafológica em formato digital ou Carta de Classificação de solo em formato digital	de	Consultar Soil Survey Manual. (1993) ou FAO. 1988. Soil map of the World	Bibliografia de OET, de agricultura regional em MIN. AGRICULTURA, em ANPRURALES	Utilizar a Carta Edafológica para o local de estudo. Outra fonte é o Mapa de solos do mundo da FAO (1988), Manual de classificação de solos da EMPBRAPA ou Soil Survey Manual (1993) da U.S.D.A. Consultar documentos regionais de agricultura ou Ordenamentos Ecológicos do Território, se estiver dentro ou próximo de alguma ANPR pode-se consultar os planos de manejo, informação do MIN. AGRICULTURA, ESALQ, UFLA, Hydraulics and Hydrology - Handbook esse manual encontra-se na internet http://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology_hydraulics/neh630/hydro_soil_groups.pdf . Prefeitura Municipal de EXTREMA.	
	Profundidade do solo	m		Profundidade do primeiro horizonte do solo			Carta Geológica			
	Textura do solo	s/u		Composição mecânica do solo, ou seja a distribuição dos tamanhos das partículas que o compõem, é uma das características mais importantes em sua classificação	Classificação com dados de campo segundo Siebe <i>et al.</i> , (1996).	Carta Edafológica impressa				
	Taxa de infiltração do solo por tipo de textura	$mm\ d^{-1}$		É a velocidade com que a frente de umedecimento atravessa o perfil do solo. É função da textura e estrutura do solo.	Medir com infiltrômetros por três meses durante um ano, ou em laboratório tomando amostras do solo.	Calcular em função dos parâmetros físicos do solo pelo método de Green-Ampt.	Hydraulics and Hydrology - Handbook cálculo das taxas segundo classificação por textura			

Caraterísti cas geo- gráficas e Topogra- ficas	Porosidade	%	50.000	É o espaço entre as partículas do solo ocupado pelo ar, depois da liberação da água.	É recomendável a obtenção desses parâmetros através de análises dos solos em laboratório.	Parâmetros de Infiltração de Green-Ampt de Clapp e Hornberger, 1978 (ver em Ven Te Chow, 1964)	Parâmetros de Infiltração de Green-Ampt de Rawls, Brakensiek e Millar, 1983 (ver em Bedient e Huber, 1992)		Considera-se que esses parâmetros podem ser consultados em livros especializados de hidrologia. Duas referências importantes são: o Handbook of Applied Hydrology de Chow, V. T., (1964) e o Hydrology and Flood plain Analysis de Bedient and Huber (1992). A capacidade de campo calcula-se com esses parâmetros.
	Capacidade de Campo	$m^3 m^{-3}$		Quantidade de água retida no solo submetida à força da gravidade.					
	Condutividade hidráulica do solo saturado.	$cm s^{-1}$		É uma propriedade física do solo que descreve a capacidade de conduzir água. Uma maior condutividade hidráulica implica numa maior velocidade na condução da água e conseqüentemente numa menor capacidade de campo.					
	Elevação (Altitude)	<i>m.s.n.m.</i>		É a altitude no local acima do nível médio do mar, se expressa em metros.	Utilizar no campo um altímetro manual ou digital, pode ser um GPS				
	Latitude do local	Graus	50.000	É a latitude em coordenadas geográficas do centróide do local, utilizada para calcular a radiação solar na atmosfera.	Carta Topográfica impressa	Modelo Digital da Área	Dados Vectoriais Topográficos	Carta Topográfica impressa	Gerar uma tabela de declividades. Inclinação do terreno por onde escoar a água excedente, se expressa em porcentagem de inclinação ou em graus de inclinação. As declividades expressam-se em mapas. Assume-se que uma maior declividade implica numa menor taxa de infiltração. Os valores de entrada giram entre 0 e 90 graus. O modelo de radiação calculado no trabalho de Voinov et al. (2004), utiliza o método de Nikolov e Zeller (1992).
	Declividade (inclinação do terreno)	Graus		As Declividades são expressas em mapas, onde 1 significa inexistência de declividade e 9 a declividade máxima. Assume-se que uma maior declividade implica uma menor taxa de infiltração. A Inclinação do terreno por onde escoar a água excedente expressa-se em porcentagem de inclinação ou em graus de inclinação. Os	Calcular a declividade com um clinômetro em campo.				

				valores de entrada são entre 0 e 90 graus.					
Hidrologia	Longitude da rede hidráulica	m		É a longitude da rede hidráulica superficial contida numa célula de simulação.	Dados vectoriais Topográficos	Carta Topográfica impressa	Carta de Águas superficiais		
	Altura do nível freático	m	250.000	O nível freático da água delimita as zonas saturada e não saturada e está definido pela superfície sobre a qual a pressão do fluido P é igual a pressão atmosférica (P=0).	Poços da ANA, de outras dependências ou privados (profundidade do poço)	Carta de Águas subterrâneas (nível estático do lençol freático) impressa	Carta Geológica impressa		
Vegetação	IAF (índice de área foliar)	s/u	Local	Área coberta pelas folhas sobre uma unidade de área da superfície utiliza-se para determinar a cobertura do dossel. É importante para o processo de interceptação e evapotranspiração.	Utilizar métodos diretos de contato (medidor de área foliar, densiômetros) e métodos diretos sem contato (fotografias hemisféricas em ponto-quadrante, vídeo gravação, análises de imagens de satélite).	Métodos de estimação utilizando tratamento de imagens de satélite de alta resolução tais como Ikonos, Quick Bird, IRS	Métodos de estimação utilizando tratamento de imagens de satélite de baixa resolução tais como Land Sat	Consultar Scurlock, J. M. O. <i>et al.</i> (2001). ORNL-U.S. DOE	Verificar a existência e disponibilidade das imagens. Pode-se considerar o IAF segundo classe de vegetação segundo dados publicados por Scurlock, J. M. O. <i>et al.</i> (2001), Roberts, J. M. <i>et al.</i> , (1996). É importante considerar que o IAF tem que ser calculado diariamente, não entanto, geraria custos muito elevados, recomenda-se então pelo menos em função da queda das folhas (condição de caducifoliedad).

Profundidade das raízes	<i>m</i>	250.000	Valor da profundidade das raízes em metros	Medir a profundidade de três estratos das raízes no campo.	Carta Geológica impressa	Consultar Canadell, J., <i>et al.</i> (1996). <i>Oecologia</i> 108:583-585	Consultar Kleidon, A. (2004) <i>Journal of Climate</i>	Uma forma indireta de mensurar a profundidade das raízes é medindo a profundidade do estrato rochoso mais próximo da superfície. É importante considerar que as florestas de coníferas se localizam em superfícies que podem estar formadas por mais de 50% de rochas e que esta profundidade depende da penetrabilidade das mesmas nestas superfícies, pode-se consultar Canadell, <i>et al.</i> (1996). <i>Oecologia</i> 108:583-585; Kleidon, A. (2004) <i>Journal of Climate</i> 17:2714-222 ou informação bibliográfica de profundidade das raízes no local de simulação.
Altura da vegetação	<i>m</i>		É a altura do dossel do estrato arbóreo da vegetação no local (à mesma latitude).	Medir em campo a altura da vegetação com qualquer método indireto.	Obter valores registrados na Carta de Uso de Solo e Vegetação Impressa			

Legenda		

Anexo E – Sub-bacia das Posses, características físicas do solo

Solo	Horizonte	Profundidade	Textura			Silte/argila	Relação Textural B/A	Textura
			Areia	Silte	Argila			
			dag/Kg					
1	A		17	42	41	1,02	1,122	Argilosa
2	B		13	41	46	0,89		Argilosa
3	A		17	54	29	1,86		Siltosa
4	A		30	41	29	1,41		Média
5	C		21	21	58	0,36		Argilosa
6	A		23	44	33	1,33	1,212	Média
7	B		19	41	40	1,03		Argilosa
8	A1		27	39	34	1,15	2,32	Média
9	A2		27	38	35	1,09		Média
10	B		11	10	79	0,13		Muito Argilosa
11	A		27	45	28	1,61	1,393	Média
12	B		18	43	39	1,10		Argilosa
13	C		23	39	38	1,03		Argilosa
14	A		25	39	36	1,08	1,50	Argilosa
15	B		20	26	54	0,48		Argilosa
16	A		22	38	40	0,95		Argilosa
17	A		59	37	4	9,25		
18	C		31	64	5	12,80		
19	A		22	38	40	0,95	1,58	Argilosa
20	B		13	24	63	0,38		Muito Argilosa
21	C		13	27	60	0,45		Argilosa
22	A		19	39	42	0,93	1,60	Argilosa
23	B		9	24	67	0,36		Muito Argilosa
24	C		8	26	66	0,39		Argilosa
25	A		20	31	49	0,63	1,24	Argilosa
26	B		16	23	61	0,38		Muito Argilosa
27	A		14	33	53	0,62	1,19	Argilosa
28	B		11	26	63	0,41		Muito Argilosa
29	A		21	39	40	0,98	1,58	Argilosa
30	B		11	26	63	0,41		Muito Argilosa
31	A		21	29	50	0,58	1,10	Argilosa
32	B		16	29	55	0,53		Argilosa
33	A		20	54	26	2,08	1,81	Siltosa
34	B		12	41	47	0,87		Argilosa
35	A		7	53	40	1,33	1,33	Argilosa
36	B		5	42	53	0,79		
37	A		12	61	27	2,26	2,00	Siltosa
38	B		9	37	54	0,69		Argilosa
39	A		14	36	50	0,72	1,26	Argilosa
40	B		11	26	63	0,41		Muito Argilosa
41	A		24	38	38	1,00	1,74	Argilosa
42	B		11	23	66	0,35		Muito Argilosa
43	A		25	43	32	1,34	1,69	Média
44	B		16	30	54	0,56		Argilosa
45	A		33	34	33	1,03		Média

Anexo F – Dados de precipitação, temperatura, umidade, vento e IAF, usados no MOVA

DIA	PRECIPITAÇÃO (mm)	TEMP MAX AR C	TEMP MIN AR C	UMIDADE	VELOCIDADE VENTO	IAF
01/01/2008	0	30,5	19,8	49	15,1	5,45
02/01/2008	0,3	27,4	18,8	49	15,1	5,45
03/01/2008	6,9	30,3	18,2	49	15,1	5,45
04/01/2008	3,8	31,4	17,4	49	15,1	5,45
05/01/2008	1,3	27,8	18,8	49	15,1	5,45
06/01/2008	26,9	28,4	17,4	49	15,1	5,45
07/01/2008	7,4	27,5	16,5	49	15,1	5,45
08/01/2008	1,8	32,6	16	49	15,1	5,45
09/01/2008	0	30,3	15,9	49	15,1	5,45
10/01/2008	0	30,9	17,1	49	15,1	5,45
11/01/2008	0,2	28,8	20	49	15,1	5,45
12/01/2008	0	28,6	20,5	49	15,1	5,45
13/01/2008	38,6	24	18,6	49	15,1	5,45
14/01/2008	4	25,6	18,9	49	15,1	5,45
15/01/2008	11,4	26,6	18,2	49	15,1	5,45
16/01/2008	7,6	28	15,9	49	15,1	5,45
17/01/2008	0	27,6	16,1	49	15,1	5,45
18/01/2008	14	27,9	18,1	49	15,1	5,45
19/01/2008	0	29,2	19,1	49	15,1	5,45
20/01/2008	21,8	26	18,9	49	15,1	5,45
21/01/2008	13,2	21,3	15,6	49	15,1	5,45
22/01/2008	1	21,8	15,3	49	15,1	5,45
23/01/2008	0	22	15,3	49	15,1	5,45
24/01/2008	0,7	25,1	15,6	49	15,1	5,45
25/01/2008	0	23,6	17,1	49	15,1	5,45
26/01/2008	0	21,5	16,1	49	15,1	5,45
27/01/2008	0	23,7	16,2	49	15,1	5,45
28/01/2008	1,3	20,8	15,5	49	15,1	5,45

29/01/2008	9,9	21,4	16,3	49	15,1	5,45
30/01/2008	31,5	26,9	15,9	49	15,1	5,45
31/01/2008	5,1	29,4	17,6	49	15,1	5,45
01/02/2008	0	31	17,3	49	15,1	5,45
02/02/2008	0	31,5	17,6	49	15,1	5,45
03/02/2008	32	26,5	18,4	49	15,1	5,45
04/02/2008	3	24,3	17,9	49	15,1	5,45
05/02/2008	0	25,7	16,9	49	15,1	5,45
06/02/2008	10,7	22,9	17,3	49	15,1	5,45
07/02/2008	5,6	28,4	17,3	49	15,1	5,45
08/02/2008	13,2	28,9	17,4	49	15,1	5,45
09/02/2008	0	30,5	16,9	49	15,1	5,45
10/02/2008	8,9	30,3	17,9	49	15,1	5,45
11/02/2008	5,6	30,7	18,7	49	15,1	5,45
12/02/2008	0	31,9	18,2	49	15,1	5,45
13/02/2008	8,6	29,8	17,7	49	15,1	5,45
14/02/2008	0	29,6	17,8	49	15,1	5,45
15/02/2008	0	28,9	18,5	49	15,1	5,45
16/02/2008	0,2	28,7	17,8	49	15,1	5,45
17/02/2008	0	30,8	19,1	49	15,1	5,45
18/02/2008	1,3	28,5	20,7	49	15,1	5,45
19/02/2008	7,4	28,4	15,3	49	15,1	5,45
20/02/2008	16,3	29,2	16,7	49	15,1	5,45
21/02/2008	7,1	28	18,2	49	15,1	5,45
22/02/2008	2,5	27,8	17,6	49	15,1	5,45
23/02/2008	0,5	27,5	18,6	49	15,1	5,45
24/02/2008	23,1	25,2	19,4	49	15,1	5,45
25/02/2008	9,4	27,3	17,6	49	15,1	5,45
26/02/2008	0	27,5	16,8	49	15,1	5,45
27/02/2008	0	26,8	17,8	49	15,1	5,45

28/02/2008	0	26	16	49	15,1	5,45
29/02/2008	0	25,7	16,4	49	15,1	5,45
01/03/2008	1,8	27,7	18,6	49	15,1	5,45
02/03/2008	42,4	30,2	16,8	49	15,1	5,45
03/03/2008	1,8	29,7	17,9	49	15,1	5,45
04/03/2008	0	29,2	17,2	49	15,1	5,45
05/03/2008	0	29,3	16,1	49	15,1	5,45
06/03/2008	0	30,2	15,3	49	15,1	5,45
07/03/2008	0	32,3	16,5	49	15,1	5,45
08/03/2008	9,4	30,8	18,2	49	15,1	5,45
09/03/2008	26,2	29,6	17,3	49	15,1	5,45
10/03/2008	0,5	30,5	17,6	49	15,1	5,45
11/03/2008	0,2	27,1	18,5	49	15,1	5,45
12/03/2008	18,8	28,4	18,6	49	15,1	5,45
13/03/2008	26,7	24,7	19,1	49	15,1	5,45
14/03/2008	25,1	20,6	16,5	49	15,1	5,45
15/03/2008	1,3	18,4	15,8	49	15,1	5,45
16/03/2008	5,1	22,7	16	49	15,1	5,45
17/03/2008	8,6	17,8	15,7	49	15,1	5,45
18/03/2008	61,5	29,6	15	49	15,1	5,45
19/03/2008	6,6	28,5	16,7	49	15,1	5,45
20/03/2008	0	28,8	16,8	49	15,1	5,45
21/03/2008	0,8	28,9	17,1	49	15,1	5,45
22/03/2008	0	28	18,7	49	15,1	5,45
23/03/2008	0	27,3	18,1	49	15,1	5,45
24/03/2008	30	28,4	17,8	49	15,1	5,45
25/03/2008	7,9	26,8	17,9	49	15,1	5,45
26/03/2008	0	25,9	16,5	49	15,1	5,45
27/03/2008	1,8	28,7	16,3	49	15,1	5,45
28/03/2008	8,1	29,1	14,8	49	15,1	5,45

29/03/2008	0	26,1	16,4	49	15,1	5,45
30/03/2008	0	23,3	16,4	49	15,1	5,45
31/03/2008	0	23,5	14,7	49	15,1	5,45
01/04/2008	0	28,2	13,5	49	15,1	5,45
02/04/2008	0	28	15,4	49	15,1	5,45
03/04/2008	0,5	23,7	16,7	49	15,1	5,45
04/04/2008	30,2	23,5	17,2	49	15,1	5,45
05/04/2008	0	22,7	15,1	49	15,1	5,45
06/04/2008	0	22,4	15,5	49	15,1	5,45
07/04/2008	26,7	25,7	16,5	49	15,1	5,45
08/04/2008	5,3	28,1	18,4	49	15,1	5,45
09/04/2008	0	30,7	18,8	49	15,1	5,45
10/04/2008	0,2	30,9	19	49	15,1	5,45
11/04/2008	11,7	29,8	16	49	15,1	5,45
12/04/2008	0,2	29,8	16,8	49	15,1	5,45
13/04/2008	7,9	29,9	15,5	49	15,1	5,45
14/04/2008	5,3	22	17,5	49	15,1	5,45
15/04/2008	20,6	21,3	16,1	49	15,1	5,45
16/04/2008	0,2	26,1	16	49	15,1	5,45
17/04/2008	6,6	15,7	16,8	49	15,1	5,45
18/04/2008	0,3	23,8	15,7	49	15,1	5,45
19/04/2008	0	24,9	15,9	49	15,1	5,45
20/04/2008	3,8	22,7	17	49	15,1	5,45
21/04/2008	7,4	25,6	16,7	49	15,1	5,45
22/04/2008	40,9	28	16	49	15,1	5,45
23/04/2008	2	26,9	13,9	49	15,1	5,45
24/04/2008	0	26,6	13,1	49	15,1	5,45
25/04/2008	0	26,9	13,3	49	15,1	5,45
26/04/2008	0	26,9	11,7	49	15,1	5,45
27/04/2008	0	27,3	11,7	49	15,1	5,45

28/04/2008	0	27,8	13	49	15,1	5,45
29/04/2008	0	28,2	14,1	49	15,1	5,45
30/04/2008	35,1	17,8	15,1	49	15,1	5,45
01/05/2008	0,3	17,6	12,8	49	15,1	5,45
02/05/2008	0	17,7	14,1	49	15,1	5,45
03/05/2008	72,4	18,1	14,5	49	15,1	5,45
04/05/2008	0,3	20,4	11	49	15,1	5,45
05/05/2008	0	21,6	10,6	49	15,1	5,45
06/05/2008	0	21,9	9,3	49	15,1	5,45
07/05/2008	0	22,8	6,5	49	15,1	5,45
08/05/2008	0	24,4	5,9	49	15,1	5,45
09/05/2008	0	20,4	6,9	49	15,1	5,45
10/05/2008	0	19	12,2	49	15,1	5,45
11/05/2008	0	19	12,6	49	15,1	5,45
12/05/2008	0	18,1	13,1	49	15,1	5,45
13/05/2008	0	19,2	13,2	49	15,1	5,45
14/05/2008	0	21,7	12,9	49	15,1	5,45
15/05/2008	0	25,6	10,9	49	15,1	5,45
16/05/2008	0,3	26,1	11,6	49	15,1	5,45
17/05/2008	0	22,2	11,8	49	15,1	5,45
18/05/2008	0	17,6	12,3	49	15,1	5,45
19/05/2008	0	27,6	13,3	49	15,1	5,45
20/05/2008	0	26,1	10,2	49	15,1	5,45
21/05/2008	0	27,1	8,8	49	15,1	5,45
22/05/2008	0	26,5	10,4	49	15,1	5,45
23/05/2008	0	26,4	9,5	49	15,1	5,45
24/05/2008	0	25,2	9,6	49	15,1	5,45
25/05/2008	0	25,2	10,4	49	15,1	5,45
26/05/2008	0	25,8	11,3	49	15,1	5,45
27/05/2008	0	26,2	10,2	49	15,1	5,45

28/05/2008	0	27,4	10,4	49	15,1	5,45
29/05/2008	0	24,5	11,2	49	15,1	5,45
30/05/2008	2,3	17,8	14,1	49	15,1	5,45
31/05/2008	2,3	13	9,7	49	15,1	5,45
01/06/2008	17,5	16,6	9,8	49	15,1	5,45
02/06/2008	0,5	20,7	10,5	49	15,1	5,45
03/06/2008	0	23,8	10,1	49	15,1	5,45
04/06/2008	25,9	20,2	10,9	49	15,1	5,45
05/06/2008	6,8	26,5	11,7	49	15,1	5,45
06/06/2008	0,3	27,5	11,8	49	15,1	5,45
07/06/2008	0	26,9	11,6	49	15,1	5,45
08/06/2008	0	26,1	11,9	49	15,1	5,45
09/06/2008	0	26,7	13,2	49	15,1	5,45
10/06/2008	0	23,5	14,9	49	15,1	5,45
11/06/2008	0	26,5	12,1	49	15,1	5,45
12/06/2008	0	26,5	12,5	49	15,1	5,45
13/06/2008	0	27	12,9	49	15,1	5,45
14/06/2008	0	26,3	12,7	49	15,1	5,45
15/06/2008	0	25,1	12,8	49	15,1	5,45
16/06/2008	12,5	14,1	9,4	49	15,1	5,45
17/06/2008	0	23	7,4	49	15,1	5,45
18/06/2008	0	25,1	7,3	49	15,1	5,45
19/06/2008	0,3	25,7	8,4	49	15,1	5,45
20/06/2008	0	26,6	10,2	49	15,1	5,45
21/06/2008	0	24	12	49	15,1	5,45
22/06/2008	0	17,8	14	49	15,1	5,45
23/06/2008	1,5	14,7	11,6	49	15,1	5,45
24/06/2008	0	15,3	10,7	49	15,1	5,45
25/06/2008	0,8	17,6	11,1	49	15,1	5,45
26/06/2008	0	21,5	11,5	49	15,1	5,45

27/06/2008	0	23,4	11,7	49	15,1	5,45
28/06/2008	0	24,6	10,6	49	15,1	5,45
29/06/2008	0	25	11	49	15,1	5,45
30/06/2008	0	25,5	10,9	49	15,1	5,45
01/07/2008	0	25,7	10	49	15,1	5,45
02/07/2008	0,1	23,9	10	49	15,1	5,45
03/07/2008	0	24,7	13,1	49	15,1	5,45
04/07/2008	0	19,9	11,6	49	15,1	5,45
05/07/2008	0	20,9	8,1	49	15,1	5,45
06/07/2008	0	25,9	8,1	49	15,1	5,45
07/07/2008	0,3	22,6	8,8	49	15,1	5,45
08/07/2008	0	23,2	7,6	49	15,1	5,45
09/07/2008	0	21,3	7,5	49	15,1	5,45
10/07/2008	0	20,1	7,9	49	15,1	5,45
11/07/2008	0	19,5	10,2	49	15,1	5,45
12/07/2008	0	22,5	9,2	49	15,1	5,45
13/07/2008	0	21,9	9	49	15,1	5,45
14/07/2008	0	22,9	6,9	49	15,1	5,45
15/07/2008	0	24,5	6,9	49	15,1	5,45
16/07/2008	0	25,1	7,5	49	15,1	5,45
17/07/2008	0	24,4	5,4	49	15,1	5,45
18/07/2008	0	24,8	5,5	49	15,1	5,45
19/07/2008	0	25,1	6,8	49	15,1	5,45
20/07/2008	0	25,3	7,9	49	15,1	5,45
21/07/2008	0	26,5	8,2	49	15,1	5,45
22/07/2008	0	26,9	10,8	49	15,1	5,45
23/07/2008	0	27,9	13,9	49	15,1	5,45
24/07/2008	0	24	10,8	49	15,1	5,45
25/07/2008	0	24,9	10,4	49	15,1	5,45
26/07/2008	0	20,1	9,9	49	15,1	5,45

27/07/2008	0	27,4	10,8	49	15,1	5,45
28/07/2008	0	28	11,6	49	15,1	5,45
29/07/2008	0	26,6	12,7	49	15,1	5,45
30/07/2008	0	26,5	11,2	49	15,1	5,45
31/07/2008	0	26,6	11,9	49	15,1	5,45
01/08/2008	0	27,4	12,4	49	15,1	5,45
02/08/2008	0	23,7	13,5	49	15,1	5,45
03/08/2008	6,6	18,5	14,2	49	15,1	5,45
04/08/2008	16,5	24,7	11	49	15,1	5,45
05/08/2008	0	28,6	11,9	49	15,1	5,45
06/08/2008	0,3	28,1	13,9	49	15,1	5,45
07/08/2008	0,3	29,6	15,5	49	15,1	5,45
08/08/2008	44,2	18,2	15,1	49	15,1	5,45
09/08/2008	6,4	19,4	13,9	49	15,1	5,45
10/08/2008	8,9	18,7	12,8	49	15,1	5,45
11/08/2008	0	28,4	11,1	49	15,1	5,45
12/08/2008	0	28,8	12,1	49	15,1	5,45
13/08/2008	0	23,3	18,3	49	15,1	5,45
14/08/2008	0	23,3	14,1	49	15,1	5,45
15/08/2008	0	25,4	14,6	49	15,1	5,45
16/08/2008	0	27,2	16,5	49	15,1	5,45
17/08/2008	0	28,2	15,4	49	15,1	5,45
18/08/2008	0	28,7	13,9	49	15,1	5,45
19/08/2008	0	26,3	13,2	49	15,1	5,45
20/08/2008	0	27,1	12,7	49	15,1	5,45
21/08/2008	0	26,7	11,6	49	15,1	5,45
22/08/2008	0	27,2	13,4	49	15,1	5,45
23/08/2008	0	21,5	14,3	49	15,1	5,45
24/08/2008	0	25,6	13,5	49	15,1	5,45
25/08/2008	0	28,2	14	49	15,1	5,45

26/08/2008	0	27,7	12	49	15,1	5,45
27/08/2008	0	24,8	10,3	49	15,1	5,45
28/08/2008	0	29,2	10,3	49	15,1	5,45
29/08/2008	0	29,2	11,9	49	15,1	5,45
30/08/2008	1,3	15,8	11	49	15,1	5,45
31/08/2008	0	20,8	10,6	49	15,1	5,45
01/09/2008	0	26,2	10	49	15,1	5,45
02/09/2008	0	28,6	10,6	49	15,1	5,45
03/09/2008	0	30,2	12,8	49	15,1	5,45
04/09/2008	0	30,6	13	49	15,1	5,45
05/09/2008	0	31	14,3	49	15,1	5,45
06/09/2008	0	31	15,2	49	15,1	5,45
07/09/2008	0	23,3	16,5	49	15,1	5,45
08/09/2008	0	21,4	13,8	49	15,1	5,45
09/09/2008	0	24,1	13,3	49	15,1	5,45
10/09/2008	0	32,7	14,2	49	15,1	5,45
11/09/2008	0	33,5	18,3	49	15,1	5,45
12/09/2008	0	32,3	18,3	49	15,1	5,45
13/09/2008	0	23,2	16,7	49	15,1	5,45
14/09/2008	9,4	22,9	13,9	49	15,1	5,45
15/09/2008	0	18,4	12,6	49	15,1	5,45
16/09/2008	0	19,4	12,4	49	15,1	5,45
17/09/2008	0	17,9	11,4	49	15,1	5,45
18/09/2008	0	20	10,3	49	15,1	5,45
19/09/2008	0	22,8	10,2	49	15,1	5,45
20/09/2008	0	20,1	10,4	49	15,1	5,45
21/09/2008	18	20,4	11,6	49	15,1	5,45
22/09/2008	10,4	20,6	11	49	15,1	5,45
23/09/2008	0	23,4	7,8	49	15,1	5,45
24/09/2008	0	20,7	10,6	49	15,1	5,45

25/09/2008	0	24	11,3	49	15,1	5,45
26/09/2008	4,3	21,3	12,9	49	15,1	5,45
27/09/2008	3,8	23,1	12	49	15,1	5,45
28/09/2008	0	22,6	11,8	49	15,1	5,45
29/09/2008	0	23,9	10,9	49	15,1	5,45
30/09/2008	0	23,6	12,5	49	15,1	5,45
01/10/2008	0	31,2	13,4	49	15,1	5,45
02/10/2008	24,4	24,7	15,9	49	15,1	5,45
03/10/2008	0,3	28,2	15,3	49	15,1	5,45
04/10/2008	0	29,8	16,6	49	15,1	5,45
05/10/2008	0	25,8	17,8	49	15,1	5,45
06/10/2008	13,2	25,8	15,3	49	15,1	5,45
07/10/2008	7,4	22,1	14,6	49	15,1	5,45
08/10/2008	0,5	18,7	14,1	49	15,1	5,45
09/10/2008	0	21	11,4	49	15,1	5,45
10/10/2008	0	22,8	11,8	49	15,1	5,45
11/10/2008	0	25,6	11	49	15,1	5,45
12/10/2008	2,3	26,3	16,5	49	15,1	5,45
13/10/2008	0,8	31,1	16,1	49	15,1	5,45
14/10/2008	0	31,1	18	49	15,1	5,45
15/10/2008	0	33,4	16,5	49	15,1	5,45
16/10/2008	0	32,5	15,6	49	15,1	5,45
17/10/2008	0	25,5	16,8	49	15,1	5,45
18/10/2008	0	24,1	17	49	15,1	5,45
19/10/2008	15,8	19	16,1	49	15,1	5,45
20/10/2008	12,5	26,4	15	49	15,1	5,45
21/10/2008	0	28,4	16,1	49	15,1	5,45
22/10/2008	2	27,9	16,7	49	15,1	5,45
23/10/2008	7,4	30,4	17,2	49	15,1	5,45
24/10/2008	0	31,2	18,8	49	15,1	5,45

25/10/2008	0,3	33,2	19,4	49	15,1	5,45
26/10/2008	0	33,2	18,2	49	15,1	5,45
27/10/2008	0	30,2	18,4	49	15,1	5,45
28/10/2008	0	25	16,8	49	15,1	5,45
29/10/2008	0	30,4	16,8	49	15,1	5,45
30/10/2008	46,7	26,7	17,9	49	15,1	5,45
31/10/2008	0,3	24,1	17,6	49	15,1	5,45
01/11/2008	0	26,3	15,2	49	15,1	5,45
02/11/2008	0	26,1	17,3	49	15,1	5,45
03/11/2008	8,6	28,6	18,3	49	15,1	5,45
04/11/2008	0,3	28,8	15,7	49	15,1	5,45
05/11/2008	0	30,2	16,6	49	15,1	5,45
06/11/2008	0	25,5	18,2	49	15,1	5,45
07/11/2008	25,4	24,9	17,9	49	15,1	5,45
08/11/2008	7,4	29,4	16,4	49	15,1	5,45
09/11/2008	0,5	31	16,2	49	15,1	5,45
10/11/2008	0	28,1	17,5	49	15,1	5,45
11/11/2008	18,3	24,5	18,4	49	15,1	5,45
12/11/2008	4,1	25,7	16,6	49	15,1	5,45
13/11/2008	20,6	29	16,4	49	15,1	5,45
14/11/2008	0	28,1	17,9	49	15,1	5,45
15/11/2008	7,1	31,2	15,7	49	15,1	5,45
16/11/2008	0	29,9	16,4	49	15,1	5,45
17/11/2008	0	22,8	18	49	15,1	5,45
18/11/2008	0	25,6	15,9	49	15,1	5,45
19/11/2008	0	23	14,1	49	15,1	5,45
20/11/2008	0	23,4	13,1	49	15,1	5,45
21/11/2008	0	24,3	12,9	49	15,1	5,45
22/11/2008	2,5	23,1	15	49	15,1	5,45
23/11/2008	32	25,4	14,5	49	15,1	5,45

24/11/2008	5,3	25,3	14,9	49	15,1	5,45
25/11/2008	0	26,5	15,5	49	15,1	5,45
26/11/2008	3,6	25,7	16,1	49	15,1	5,45
27/11/2008	10,2	26,3	16,5	49	15,1	5,45
28/11/2008	0	26,5	15,7	49	15,1	5,45
29/11/2008	0	27,3	15,7	49	15,1	5,45
30/11/2008	0	27,6	15,9	49	15,1	5,45
01/12/2008	0	30,6	15,4	49	15,1	5,45
02/12/2008	0	31	17,6	49	15,1	5,45
03/12/2008	35,3	26,6	17,1	49	15,1	5,45
04/12/2008	0	24,2	12,2	49	15,1	5,45
05/12/2008	0	25,9	12	49	15,1	5,45
06/12/2008	0	28	13	49	15,1	5,45
07/12/2008	0	28,6	13,3	49	15,1	5,45
08/12/2008	0	30,6	14,7	49	15,1	5,45
09/12/2008	0	31,3	14	49	15,1	5,45
10/12/2008	0	30	18,4	49	15,1	5,45
11/12/2008	14,7	25,8	18	49	15,1	5,45
12/12/2008	4,6	19,9	15,9	49	15,1	5,45
13/12/2008	1	24	14,7	49	15,1	5,45
14/12/2008	0	25,3	14,9	49	15,1	5,45
15/12/2008	1,8	26,2	17,1	49	15,1	5,45
16/12/2008	0,3	24,6	16,5	49	15,1	5,45
17/12/2008	40,6	28,5	16,7	49	15,1	5,45
18/12/2008	0,3	26,4	17,3	49	15,1	5,45
19/12/2008	4,3	26,4	16,5	49	15,1	5,45
20/12/2008	32	25,6	17,8	49	15,1	5,45
21/12/2008	17,5	25,7	16,7	49	15,1	5,45
22/12/2008	17,8	27,2	17,1	49	15,1	5,45
23/12/2008	2	28,7	18,8	49	15,1	5,45

24/12/2008	7,1	30,6	19,8	49	15,1	5,45
25/12/2008	11,4	25,7	18,6	49	15,1	5,45
26/12/2008	7,1	24,4	18,3	49	15,1	5,45
27/12/2008	0,3	24	16,3	49	15,1	5,45
28/12/2008	0	30,6	16,2	49	15,1	5,45
29/12/2008	0	32,3	17,2	49	15,1	5,45
30/12/2008	0	28,2	16,4	49	15,1	5,45
31/12/2008	0	29,6	17,5	49	15,1	5,45

Anexo G – Estimação da evapotranspiração através do método de THORNTHWAITE (mm mês⁻¹)

Local	Extrema			Latitude (S o N):	S					
Latitude:	-22,855 °			graus	22,0					
Latitude:	-0,3989	radianos		minutos	51,0					
				segundos	18,0					
						SolarDec(δ)	Sunset h angle(ws)	Astronomic Daylight (N)		
mes	T°C med	ICmês	Evapmês	Nd/mês	Dia Jul	radianos	H (rad)	Nhrs	L corrD	Thornthwaite
Jan	27	12,84826	138,0746	31	15	-0,3702158	1,735120462	13,25534	1,141432	157,60
fev	28	13,57553	162,1949	28	46	-0,2303127	1,669786345	12,75623	0,992151	160,92
mar	28	13,57553	162,1949	31	74	-0,0473981	1,590790517	12,15274	1,046486	169,73
abr	27	12,84826	138,0746	30	105	0,16583675	1,500191019	11,46062	0,955051	131,87
mai	28	13,57553	162,1949	31	135	0,32881801	1,426481081	10,89751	0,938397	152,20
jun	29	14,31627	189,4551	30	166	0,40682235	1,388179908	10,60491	0,883743	167,43
jul	30	15,07027	220,1344	31	196	0,37458075	1,404322338	10,72823	0,92382	203,36
ago	30	15,07027	220,1344	31	227	0,2389623	1,467932518	11,21418	0,965665	212,58
sep	29	14,31627	189,4551	30	258	0,0368937	1,555238267	11,88115	0,990095	187,58
oct	29	14,31627	189,4551	31	288	-0,1690485	1,642797587	12,55005	1,080699	204,74
nov	28	13,57553	162,1949	30	319	-0,3349882	1,718052367	13,12495	1,093746	177,40
dez	27	12,84826	138,0746	31	349	-0,4071701	1,753589477	13,39644	1,153582	159,28
	ICanual=	165,9362							TOTAL	2084,70
	param a=	4,427124								